Origins

NÚMERO 8 2008

Versión en español
editada por:

Aula7activ@

EDICIÓN EN INGLÉS:

Edita
Geoscience Research Institute (afiliado a la Universidad Andrews, Berrien Springs, Michigan)
11060 Campus Street, Loma Linda, California 92350, USA.

Redactor jefe
Dr. L. James Gibson

Redactor jefe adjunto
Dr. Timothy G. Standish

Ayudante de edición
Katherine Ching

Redacción
Dr. Leonard R. Brand
Dr. Benjamin L. Clausen
Dr. Raúl Esperante

Consultores
Dr. Niels-Erik Andreasen
Dr. John T. Baldwin
Dr. Robert H. Brown
Dr. Ronald L. Carter
Dr. Arthur V. Chadwick
Dr. Harold G. Coffin
Dr. Ivan G. Holmes
Dr. George T. Javor
Dr. Edwin A. Karlow
Dr. George W. Reid
Dr. Ariel A. Roth
Dr. Ivan E. Rouse
Dr. William H. Shea
Dr. Clyde L. Webster
Dr. Kurt P. Wise
Dr. Randall W. Younker

ORIGINS es una publicación periódica sin ánimo de lucro cuyo propósito es facilitar información relacionada con los orígenes y la historia del mundo natural. Esta publicación aborda las cuestiones relacionadas con el inicio de la vida desde un enfoque multidisciplinar. Las opiniones expresadas en los artículos son las de sus autores y no tienen que coincidir necesariamente con las del Geoscience Research Institute.

EDICIÓN EN ESPAÑOL:

Edita
Aula7activa
Barcelona
Teléfono: 616 754 880
E-mail: info@aula7activa.org
Web: www.aula7activa.org
www.aeguae.org

Equipo editorial Aula7activa

Gestión
Mercè Gascón Pomar

Redacción
Ramon-Carles Gelabert i Santané

Edición de libros
Francisco Giménez Rubio

Diseño gráfico y maquetación
Esther Amigó Marset

Informática
Albert Prat Amigó

Redacción *Origins*-ed. esp.

Redactor
Ramon-Carles Gelabert i Santané

Traducción
Daniel Bosch Queralt

Revisión Científica
Josep Antoni Álvarez Rodríguez
Raúl Esperante Caamaño
Celedonio García-Pozuelo Ramos

Maquetación
Esther Amigó Marset

Depósito Legal: B-6935-2004

© Geosciencie Research Institute
© 2006, Aula7activa-AEGUAE, en español para todo el mundo

Aula7activa es la editora sin ánimo de lucro de la Asociación de Estudiantes y Graduados Universitarios Adventistas de España (AEGUAE)

SUMARIO

5 Editorial
Las especies del Génesis y el erizo de mar
Jim Gibson

11 Artículo
Interdependencia irreducible: Una propiedad ecológica semejante a la complejidad irreducible ilustrada con el ciclo del nitrógeno
Henry A. Zuill
Timothy G. Standish

63 Comentarios bibliográficos

73 Reseñas de libros

¿AMIGO O ENEMIGO?
Leonard BRAND. (2006) *Beginnings: Are Science and Scripture Partners in the Search for Origins?*
Comentado por Dr. Jerry Bergman

NO EVO-DEVO
Giuseppe SERMONTI. (2005). *Why is a Fly not a Horse?*
Comentado por Dr. David N. Mbungu

¿QUIÉN CREÓ TODO ESTO?
Guillermo GONZÁLEZ; Jay W. RICHARDS. (2004). *The Privileged Planet: How Our Place in the Cosmos is Designed for Discovery*.
Comentado por Dr. Mart de Groot

93 Apuntes de Ciencia
Genomas y diseño
Timothy G. Standish

Nota a la presente edición: La edición española de *Origins* sigue fielmente el contenido de la edición original inglesa, sin proceder a selección o añadido alguno. El presente número de *Origins* (ed. esp.), nº 8, año 2008, corresponde al número 60, año 2007 de *Origins* de la edición original inglesa.

EDITORIAL

LAS ESPECIES DEL GÉNESIS Y EL ERIZO DE MAR

Jim Gibson

Una gran parte de los creacionistas creen que los distintos tipos de organismos fueron creados y recibieron la orden de reproducirse «según su especie». Por esa razón, a muchos les resultará sorprendente descubrir que esa idea no es bíblica.

Me convencí de ello unos años atrás, mientras preparaba una conferencia sobre los límites al cambio de las especies. Busqué todos los textos bíblicos que usasen expresiones similares a «según su especie» o «según sus especies» y presté atención al verbo al cual iban asociadas. Casi todos ellos se encontraban en tres contextos. El primero era la creación y, con una única excepción el verbo era 'crear'. Las distintas clases de animales fueron creadas «según sus especies».[1] Aquí se refiere al origen de las distintas clases de criaturas, pero no dice nada al respecto de su reproducción.

La única excepción posible es Génesis 1: 11-12, en que el texto fue traducido como «árboles frutales que den fruto según su espe-

[1] Si no se indica de manera explícita, la versión de la Biblia utilizada en esta traducción será la Nueva Biblia Española (NBE). (*N. del T.*)

cie».[2] En este punto, aparentemente, el autor afirma que las distintas clases de árboles frutales darían distintas clases de fruto, de manera que cada árbol se pudiese identificar por sus frutos (*cf.* Mateo 12: 33). Así pues, el tipo de fruto producido sería constante, independientemente de si el texto no prohíba que el árbol en sí cambie de apariencia, y la experiencia común demuestra que la estructura de las plantas es muy variable.

El segundo contexto en que se usan expresiones similares a «según su especie» es la descripción de los animales que entran en el arca. En este caso, el verbo se refiere a su entrada en el arca, no a su reproducción. El tercer contexto es la lista de los animales puros e impuros. Aquí tampoco se hace mención alguna a la reproducción. De hecho, la Biblia no dice nada en absoluto al respecto de criaturas cuya descendencia tenga una apariencia igual a sus padres. La idea de la inmutabilidad de las especies no tiene un origen bíblico, sino que surgió a partir de la filosofía de Platón y sus seguidores, quienes ponían el énfasis en la noción de tipos ideales. Los individuos podían variar respecto del tipo, pero el ideal permanecería constante y la variación tendría un límite.

Así pues, ¿qué significa la expresión «según su especie»? en primer lugar debe significar que las distintas criaturas fueron creadas cada una de ellas en el seno de una categoría definida. Por ejemplo, las criaturas que se mueven por el agua fueron creadas «según sus especies»; por lo que desde el principio de la creación ya hubo diversidad de especies. Podemos llegar a conclusiones similares para los pájaros, los reptiles y los animales terrestres. La diversidad es una característica original de la creación. El concepto de múltiples linajes de origen independiente se conoce con el nombre de “polifilia”.

La polifilia es el componente clave de la teoría creacionista. Contrasta con la “monofilia”, noción según la cual todos los organismos vivos comparten un ancestro común. La monofilia es la idea domi-

---

[2] KIDNER, D. *Genesis: An Introduction and Commentary*. Downer’s Grove, Illinois: InterVarsity Press (1967), p. 48.

nante en la teoría evolucionista, por más que algunos evolucionistas aceptarían un pequeño número de linajes independientes. Charles Darwin sugirió la idea de "algunos" ancestros originales, la cual es posible denominar como "oligofilia". Aun así, la expresión 'según sus especies' no deja de contradecir la teoría evolucionista, no a causa de que las especies no puedan cambiar de aspecto, sino porque excluye tanto la monofilia como la oligofilia.

¿Cuál es la posición que debe tomar un creacionista al respecto de la magnitud de los cambios en las especies? ¿Es posible que las especies hayan experimentado grandes cambios desde su creación original? La respuesta a estas preguntas debe tener en cuenta los descubrimientos de la ciencia. Y, sin embargo, la ciencia todavía no tiene la respuesta. El problema reside en el hecho de que las características morfológicas son el resultado de los procesos de desarrollo embrionario y el conocimiento que se tiene de la base genética de dichos procesos es escaso. Nos es preciso un organismo cuyo desarrollo embrionario haya sido objeto de estudio durante mucho tiempo: el erizo de mar.

Durante más de un siglo, el erizo de mar ha sido el organismo modelo para el estudio del desarrollo embrionario. Los erizos de mar tienen varias características que hacen de ellos un elemento útil para el estudio del desarrollo. Producen millones de huevos transparentes y fáciles de modificar genéticamente. Al cabo de aproximadamente 48 horas de desarrollo, el embrión de erizo de mar alcanza el último estadio de gástrula y se compone de alrededor de 800 células distribuidas en un total de 10 a 15 tipos distintos. Hacia el fin del tercer día, el embrión se desarrolla y se transforma en una larva relativamente sencilla llamada equinopluteus. El estudio del erizo de mar ha revelado muchos aspectos del desarrollo, si bien todavía queda mucho por descubrir.

Recientemente se ha secuenciado el genoma del erizo de mar de California, *Strongylocentrotus purpuratus*, y se han abierto muchas posibilidades para entender la base genética del desarrollo de estas criaturas, lo que, posiblemente, sea de ayuda para entender el desarrollo de otros tipos de organismo.

Aunque el erizo de mar todavía se resista a revelar muchos secretos de la base genética de su desarrollo, lo que ya se conoce es importante. El erizo de mar tiene alrededor de 23.000 genes, un número similar al de los seres humanos. Más de la mitad de esos genes, unos 12.000, son empleados en los primeros dos días de su desarrollo. Ello resulta aún más desconcertante si se tiene en cuenta que la mayoría de las células del embrión de dos días son rechazadas cuando la larva equinopluteus se transforma en la forma adulta del erizo de mar que nos resulta familiar. Esta observación sugiere que muchos de los genes tienen funciones distintas en la larva y en el adulto. De ser así, sería muy difícil establecer cambios drásticos en la morfología del erizo de mar, ya que los cambios tolerados por un equinopluteus podrían ser letales para un adulto.

Parece que los científicos están en vías de descubrir los efectos morfológicos de los cambios genéticos. En este momento se desconocen los resultados. Pero supongamos que se descubra que unos pocos cambios genéticos clave, digamos veinte, pudiesen transformar un erizo de mar en una estrella de mar o en un pepino de mar. ¿Refutaría la creación? O supongamos que los científicos descubriesen la genética del desarrollo de los mamíferos y, con unos pocos cambios genéticos (digamos diez), fuesen capaces de transformar un camello en un ciervo o un perro en un gato. ¿Cómo responderían los creacionistas? ¿Acaso el Creador se sirvió de una plantilla genética a la que le fue añadiendo distintos detalles para establecer los distintos linajes? De ser así, en muchos aspectos los resultados se parecerían a las predicciones de la teoría evolucionista.

Por otra parte, supongamos que los científicos descubriesen que el desarrollo depende de una interacción entre los genes tan delicada que deja escaso margen para los cambios. Supongamos que se descubre que es imposible que un organismo sobreviva a un cambio importante en el plano anatómico de su cuerpo y que las variaciones se limitan a modificaciones de menor importancia tales como cambios en las dimensiones lineales. ¿Refutaría la evolución? ¿Cómo responderían los evolucionistas?

Si la historia es una guía fiable, es probable que, en lugar de ser clara y concisa, la respuesta que surja del estudio del desarrollo revele niveles de complejidad creciente. Sin embargo, será útil que reconozcamos las limitaciones de nuestros conocimientos aun cuando queramos aumentar nuestra comprensión del desarrollo y los límites potenciales del cambio en las especies. Al final, deberíamos llegar a una mejor comprensión del cambio morfológico potencial en los miembros de un linaje y mejorar nuestra capacidad de calcular el número y la identidad de los muchos linajes creados de manera separada a los cuales solemos referirnos como las “especies del Génesis”.

ARTÍCULO

INTERDEPENDENCIA IRREDUCIBLE: UNA PROPIEDAD ECOLÓGICA SEMEJANTE A LA COMPLEJIDAD IRREDUCIBLE ILUSTRADA CON EL CICLO DEL NITRÓGENO

Henry A. Zuill
Profesor retirado de Biología
y
Timothy G. Standish
Geoscience Research Institute

RESUMEN

El ciclo del nitrógeno es un itinerario ecoquímico[3] distribuido a escala global que incluye múltiples organismos. Las reacciones que componen el ciclo del nitrógeno están catalizadas por complejas máquinas proteicas, de algunas de las cuales –como el sistema fijador del nitrógeno en las leguminosas– es posible argumentar que sea irreduciblemente complejo (CI). El objeto de estudio de este trabajo no son esos sistemas, sino el conjunto de todo el ciclo en el

[3] Con el término 'ecoquímico' definimos una serie de reacciones bioquímicas semejantes a un itinerario bioquímico, pero distribuido a lo largo de múltiples especies en lugar de un único organismo. Cada paso del itinerario puede tener la mediación de una única especie o una multiplicidad de ellas, todas ellas capaces de llevar a cabo esa reacción bioquímica específica.

cual participan, y plantea la cuestión de si el sistema en sí se parece a un sistema CI, con independencia de que sus componentes puedan ser o no un CI.

INTRODUCCIÓN

Los recientes argumentos en favor del diseño se han servido de la información codificada en el ADN y las máquinas moleculares de complejidad irreducible. En el nivel molecular, el conocimiento ha alcanzado un nivel suficiente para entender la naturaleza y el comportamiento de los átomos y las moléculas con cierto grado de fiabilidad. Por eso cuando interpretamos que los átomos están ordenados de maneras distintas a las requeridas por sus respectivas naturalezas, y ello de manera notablemente fortuita, parece razonable inferir algún tipo de causa inteligente. Tal es el caso en que los átomos se ordenan para codificar información, como sucede en el ADN, y también en los átomos ordenados para formar complejas máquinas moleculares o cadenas de montaje bioquímicas.

En su innovador libro sobre el tema del diseño inteligente (DI),[4] Michael Behe popularizó el término 'complejidad irreducible' (CI) y defendió que ciertos sistemas bioquímicos muestran esta propiedad. Behe definió la CI como: «Un solo sistema compuesto por varias piezas armónicas e interactuantes que contribuyen a una función básica, en el cual la eliminación de cualquiera de esas piezas impide al sistema funcionar.»[5]

Por ello, para saber si un sistema es irreduciblemente complejo:

1. Debemos conocer su función.
2. Es preciso que se componga de múltiples partes interactuando entre sí.
3. Esas partes deben ser armónicas.

---

[4] BEHE, M. J. (1999). *La caja negra de Darwin. El reto de la bioquímica a la evolución.* Barcelona: Andrés Bello.

[5] Ibíd. p. 60.

4. Al menos un subconjunto de esas partes debe ser indispensable para que el sistema funcione a un nivel mínimo. (Nótese que no todas las partes deben ser indispensables.)

Los ejemplos de sistemas bioquímicos irreduciblemente complejos van desde el flagelo bacteriano similar a una máquina hasta la compleja cascada de acontecimientos bioquímicos que se da en la formación de los coágulos sanguíneos. Behe también discute la biosíntesis de adenosín monofosfato (AMP) que bien pudiera no ser irreduciblemente complejo, pero que también presenta problemas para la construcción gradual.

Todos los ejemplos de Behe se limitan a una única célula o, a lo sumo, al mismo organismo. Es claro que ello tiene profundas implicaciones si su tesis –que la presencia de sistemas de CI excluye la explicación darwiniana– es correcta. Pero Behe no restringió los itinerarios bioquímicos y los sistemas irreduciblemente complejos únicamente a los encontrados en un único organismo. De hecho, dio alas a la posibilidad de examinar sistemas más complejos para ver si presentan propiedades semejantes a la CI: «Si un agente inteligente diseñó algunos sistemas bioquímicos, teniendo en cuenta las herramientas mediante las cuales llegamos a esa conclusión, ¿cómo analizaremos otros sistemas bioquímicos que pueden ser más complicados y menos discretos que aquellos que ya hemos discutido?»[6]

En este trabajo intentaremos abordar esta cuestión argumentando que el ciclo del nitrógeno (ciclo N) presenta propiedades que se parecen a la CI, pero difiere significativamente de los ejemplos propuestos por Behe. Puesto que el ciclo ecoquímico del nitrógeno está distribuido entre múltiples especies, en el supuesto de que la afirmación de Behe, al respecto de que la CI excluye el origen darwiniano, sea consistente, el ciclo del nitrógeno presenta implicaciones

[6] BEHE, M. J. (1998). «Intelligent Design Theory as a Tool for Analyzing Biochemical Systems». En: DEMBSKI, W. A. (ed.). (1998). *Mere Creation: Science, Faith & Intelligent Design*. Downers Grove, Illinois: InterVarsity, pp. 177-194.

que van más allá de las inherentes a los sistemas de CI de un único organismo.

EL CICLO DEL NITRÓGENO

La función del ciclo N es regular la concentración de varias moléculas que contienen nitrógeno en el medioambiente, de manera que la vida pueda subsistir. Para quienes estén acostumbrados a pensar en el ciclo N principalmente como la fijación del nitrógeno para la producción de aminoácidos y otras moléculas que contienen nitrógeno, esto puede resultar, cuando menos, contradictorio. Sin embargo, cuando se contempla desde el punto de vista global, el ciclo N consigue precisamente eso. En la naturaleza mantiene la reactividad de los óxidos de nitrógeno, así como la actividad química de los compuestos reducidos de nitrógeno, en especial el amoniaco, en unos niveles que permitan la existencia de la vida, al tiempo que asegura la disponibilidad de nitrógeno reducido cuando lo requiere el crecimiento.

Esencialmente, el ciclo N funciona para asegurar que la vasta mayoría de los átomos de nitrógeno se mantengan en la forma del gas inerte N_2, a la vez que la mayoría del resto del nitrógeno se encuentra en los seres vivos o sus productos de desecho. El ciclo actúa como un intermediario vital para los cambios de las moléculas que contienen nitrógeno en el medio ambiente, a la vez que asegura la disponibilidad de nitrógeno reducido con fines biológicos. Es evidente que en lo distintos biomas de la Tierra se produce alguna variación y, al mismo tiempo, en el pasado se produjeron desviaciones respecto a las abundancias relativas de nitrógeno en sus distintos estados químicos. Aun así, la vida necesita que la concentración de las distintas formas de nitrógeno en el medio ambiente no supere unos límites. En la mayoría de los casos, el ciclo biológico del nitrógeno impide que esos límites se vean rebasados. Puesto que conocemos la función ecológica del ciclo N, se cumple la primera exigencia de Behe al respecto de que se conozca la función.

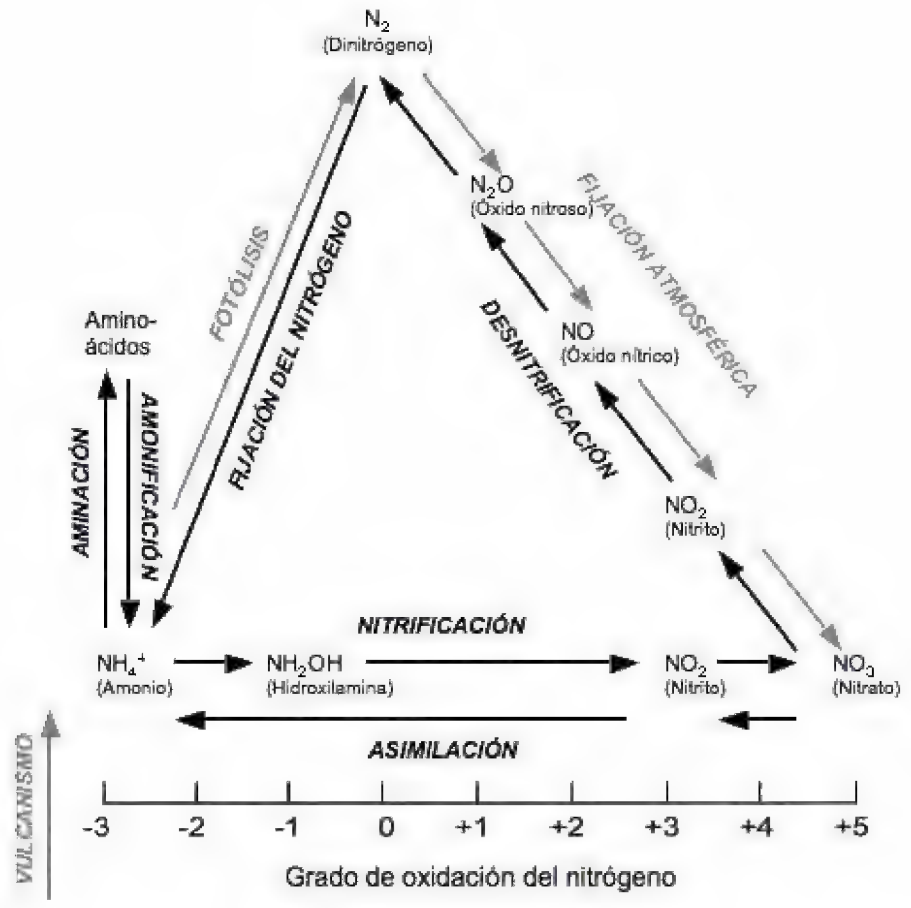

Figura 1. El ciclo del nitrógeno. El ciclo del nitrógeno comprende una serie de reacciones de oxidación-reducción interconectadas. De los principales estados inorgánicos en que se encuentra el nitrógeno, el más común es, de lejos, el nitrógeno, gas atmosférico inerte, seguido de los nitratos y el amonio, cuya abundancia relativa varía según el medio ambiente. El nitrógeno de las proteínas y otras moléculas orgánicas que contienen nitrógeno constituye otra importante reserva de este elemento químico. A excepción del nitrato, los distintos óxidos reactivos del nitrógeno mostrados se encuentran en menor abundancia. Los procesos abióticos que son la imagen especular del ciclo se indican en gris. Esos procesos abióticos contribuyen de manera menor al mantenimiento del ciclo y su función global de regular la abundancia de las distintas moléculas que contienen nitrógeno. Esta figura es una modificación de la Figura 1 de CABELLO, P.; ROLDÁN, M. D.; MORENO-VIVIÁN, C. (2004). «Nitrate reduction and the nitrogen cycle in archaea». *Microbiology* 150: 3.527-3.546.

La figura 1 es la representación típica del ciclo N. Queda claro que dicho ciclo se compone de múltiples partes, por lo que cumple el segundo criterio establecido por Behe para que un sistema pueda ser considerado de CI. Determinar si esas partes son o no "armónicas" es asunto crucial. El grueso del resto de este artículo examinará dos puntos:

1. Que algunas partes del ciclo sean indispensables. Con esto nos referimos a que una parte sea necesaria para que el ciclo funcione y que la falta de ese paso conlleve la no consecución de la función total del ciclo.
2. Que algún tipo de proceso natural paso a paso y sin intervención externa pueda producir el ciclo del nitrógeno tal y como lo conocemos. En otras palabras, ¿es posible eludir las partes del ciclo mediante procesos inorgánicos conocidos de tal manera que el ciclo pueda ser el resultado de un proceso de ensamblaje incremental por el que paulatinamente se añadieron mecanismos biológicos hasta que el ciclo dejó de ser un proceso abiótico para convertirse en completamente biológico? ¿Hay pasos necesarios que en la práctica no son eludibles con procesos inorgánicos?

En resumen, ¿son las distintas etapas del ciclo de nitrógeno indispensables para que cumpla su función y representan funciones de las cuales se supone que la sola acción de la naturaleza es incapaz de evitar?

CINCO ETAPAS DEL CICLO DEL NITRÓGENO

El ciclo del nitrógeno, del que a veces se dice que es una red, consta de cinco etapas. La primera, **fijación del nitrógeno**, es el proceso mediante el cual el nitrógeno atmosférico se reduce a amoniaco. Esta etapa es especialmente importante y se compone de múltiples subetapas. La segunda etapa, **nitrificación**, primero convierte el amoniaco en nitrito y luego en nitrato. Otra etapa, **desnitrificación**, devuelve el nitrógeno a la atmósfera transformando los nitratos en nitrógeno u óxido nitroso, otro gas. La cuarta etapa, **asimilación**,

convierte los nitratos otra vez en nitritos y, finalmente, en amoniaco. Este amoniaco se emplea en la producción de aminoácidos a través de la aminación y los aminoácidos se usan para producir compuestos biológicos tales como proteínas o sirven como substrato para la producción de otras moléculas que contengan nitrógeno, que incluyen a los ácidos nucleicos. La última etapa del ciclo es la **descomposición** o amonificación (conocida también como mineralización), en la que el nitrógeno de los desperdicios y la descomposición de los residuos nitrogenados se transforma en amoniaco y se recicla. Este proceso suele ser lento, por lo que la mayoría de los desperdicios nitrogenados permanecen en el suelo como moléculas orgánicas de gran tamaño (aminoácidos, por ejemplo, y fragmentos de proteínas) que se convierten lentamente en amoniaco. Esos aminoácidos y residuos proteicos son susceptibles de ser absorbidos directamente por las plantas.[7]

En cada etapa del ciclo del nitrógeno intervienen enzimas especializados albergados en organismos muy variados. El ciclo del nitrógeno, que incorpora un amplio espectro de especies que colaboran de manera inconsciente, funciona como una extraordinaria e impresionante cadena de montaje. Si los pasos que la componen son indispensables e ineludibles será objeto de examen en las siguientes secciones de este artículo.

1A. Fijación del nitrógeno – Visión general

La fijación del nitrógeno se da de tres maneras distintas. Dos de ellas son naturales: 1) Fijación atmosférica (rayo). 2) Fijación biológica. 3) Fijación industrial, usada para la sintetización de fertilizantes y explosivos. En este artículo se comentará la fijación atmosférica y biológica, pero la industrial solo se mencionará allí donde ayude a

[7] PERSSON, J.; NÄSHOLM, T. (2001) «Amino acid uptake: a widespread ability among boreal forest plants». *Ecology Letters* 4: 434-438.

entender el impacto del desequilibrio en el ciclo natural del nitrógeno.

La fijación biológica del nitrógeno en sí misma podría ser objeto de toda una argumentación pero, de acuerdo con el propósito de esta discusión, la consideración más importante es el producto final, el amoniaco (NH_3). En las células este producto químico reactivo necesita un trato de cierta precisión para que reaccione con el substrato adecuado y forme aminoácidos. Estas moléculas de aminoácido sirven de donantes de nitrógeno durante la síntesis de otras moléculas que contienen nitrógeno como aminoácidos más complejos y las bases nitrogenadas de los nucleótidos.

1B. Fijación atmosférica del nitrógeno

Una cantidad de nitrógeno reducida, aunque no insignificante, se fija cuando los relámpagos cruzan la atmósfera. Otros fenómenos, como el impacto térmico resultante del choque de los meteoritos con la atmósfera, pueden tener un efecto similar. El impacto térmico divide las moléculas de nitrógeno (N_2) y permite que los átomos separados se combinen con el oxígeno produciendo óxidos de nitrógeno muy reactivos que, en última instancia, se combinan con agua para formar ácido nítrico (HNO_3). En el suelo, el ácido nítrico se convierte en nitratos. Los nitratos derivados de la fijación atmosférica se mezclan con los nitratos de origen biológico y son asimilados por los microbios y las plantas o son devueltos como nitrógeno a la atmósfera mediante la desnitrificación.

1C. ¿Es capaz la fijación atmosférica del nitrógeno de suplir la fijación biológica?

Puesto que es posible producir nitratos en ausencia de fijación biológica, podría ser tentador sugerir que este paso biológico del ciclo del nitrógeno no es indispensable. En la vida real, no es así a causa

de tres factores: 1) Los nitratos procedentes de la fijación atmosférica deben ser reducidos a amoniaco para ser biológicamente útiles. 2) Las tormentas eléctricas y otras causas de la fijación atmosférica son más comunes en algunos lugares, mientras que en otros son escasas; por lo que el nitrato producido de esta manera se distribuye de manera irregular. 3) La cantidad de nitrógeno que fija el impacto térmico es relativamente pequeña, por lo que este método no se puede considerar ni coherente ni suficiente por sí mismo para sostener la vida tal y como se conoce en la actualidad.

Un autor estimó, quizá de manera generosa, que la fijación atmosférica del nitrógeno produce alrededor del 10% del total de nitrógeno fijado en la naturaleza.[8] Otra referencia[9] sugiere que los relámpagos fijan un total anual estimado de 3 a 5 Tg,[10] mientras que la fijación bacteriana anual alcanza los 90 a 130 Tg. Por ello, el 10% aparece como el límite superior de las estimaciones y el porcentaje real podría ser aún mucho más reducido. Un factor de complicación es la contribución de la agricultura, en especial el cultivo intensivo de leguminosas y arroz que durante el pasado siglo aumentó de manera significativa la fijación biológica en los continentes. En el pasado la contribución de la fijación atmosférica del nitrógeno pudo haber sido mayor en cifras relativas, pero la cantidad actual de nitrógeno fijado de esta manera se espera que permanezca constante.

La fijación atmosférica del nitrógeno no pudo haber formado parte de un mecanismo inicial mediante el cual se iniciase la vida ya que su producto, los nitratos, no son biológicamente útiles de manera directa. Además, no existe un mecanismo abiótico que convierta los nitratos en formas biológicamente útiles como el amonio, de manera que pueda suplir el vacío existente entre los productos de la

---

[8] SMITH, R. L. (1996). *Ecology and Field Ecology* 5ª ed. Nueva York: Harper Collins.

[9] JAMES, N.; GALLOWAY, J. N. (1998) «The global nitrogen cycle: changes and consequences». *Environmental Pollution* 102: 15-24.

[10] 1 Tg = 10^{12} g

fijación atmosférica y la fijación biológica. No existen enzimas compartidas entre la fijación biológica del nitrógeno y la asimilación, aun cuando su producto final –el amoniaco– sea el mismo. Como consecuencia, no se puede explicar uno como una adaptación relativamente simple del otro para desempeñar una tarea diferente.

En los organismos vivos actuales, la fijación biológica del nitrógeno necesita que la fotosíntesis o la quimiosíntesis proporcionen energía y cadenas de carbono para la aminación, de manera que se produzcan aminoácidos. Es especialmente significativo que tanto la fotosíntesis como la quimiosíntesis necesiten proteínas que contienen nitrógeno. Por lo tanto, en dichos organismos se plantea el acertijo de saber si fue primero el huevo o la gallina que la fijación atmosférica del nitrógeno es incapaz de resolver (Figura 2). Además, durante la asimilación la energía reductora puede proceder de la fotorrespiración,[11] por lo que existe un vínculo que une la fotosíntesis a la asimilación y la fijación del nitrógeno.

El modo en que los nitratos se modificaron de manera abiótica para formar compuestos biológicamente útiles no está claro. Aun cuando la energía necesaria para la fijación del nitrógeno o su asimilación no procediese de la fotosíntesis o la quimiosíntesis, persistiría la necesidad de una fuente energética. Además, las enzimas que median las reacciones necesarias también son precisas. Sería posible construir una vía alternativa a la fotosíntesis, pero no está claro que proporcione un itinerario plausible más evolucionado. Con independencia del mecanismo, la catálisis de las proteínas parece indispensable y su producción necesita los productos finales de la fijación del nitrógeno, los aminoácidos y los nucleótidos.

[11] RACHMILEVITCH, S.; COUSINS, A. B.; BLOOM, A. J. (2004). «Nitrate assimilation in plant shorts depends on photorespiration». *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 101 (31): 11.506-11.510.

Figura 2. Ecología del ciclo del nitrógeno. El ciclo del nitrógeno necesita nitrógeno atmosférico, una fuente de energía (es típica la fotosíntesis) y una colaboración enzimática. La fotosíntesis también proporciona esqueletos de carbono para los aminoácidos que se aminan con el nitrógeno fijado por el ciclo del nitrógeno. A su vez, esos aminoácidos sirven como ladrillos de construcción para las enzimas y otras proteínas involucradas en la fotosíntesis y el ciclo del nitrógeno; los aminoácidos proporcionan el nitrógeno que se encuentra en los nucleótidos, los cuales son cruciales para el metabolismo energético y sirven de ladrillos para la construcción del ADN y el ARN. En última instancia, las proteínas enzimáticas actúan de mediadoras en la manufactura de todas las macromoléculas biológicas. Por lo tanto, todos los procesos vitales que se dan en los seres vivos están vinculados de manera interdependiente a través del ciclo del nitrógeno. Nótese que la asimilación y la descomposición forman parte efectiva del ciclo, pero, en aras de la claridad, en este gráfico esos procesos se han identificado por separado.

Un impedimento adicional a la utilidad biológica de la fijación atmosférica del nitrógeno viene del hecho de que los nitratos se forman a partir de una reacción con el oxígeno. En la naturaleza, el nitrógeno puede existir en estados de oxidación positiva que van del 1 al 5[12] (ver Figura 1). Por lo general, los óxidos de nitrógeno son inestables y se descomponen para formar óxido nítrico (NO, monóxido de nitrógeno) o dióxido de nitrógeno (NO_2). Ambos óxidos de nitrógeno son radicales libres muy reactivos. El NO_2 forma parte del *smog* fotoquímico marrón de algunas ciudades y sirve para catalizar la producción del ozono (O_3), un potente oxidante. El ozono oxida las moléculas orgánicas y, de haber estado presente en bajas concentraciones suficientes para destruir las moléculas orgánicas de origen abiótico, habría obstaculizado la acumulación del caldo orgánico que se cree que fue necesaria para el origen "natural" de la vida. De ese modo, a pesar de la formación de nitratos como resultado de la fijación atmosférica, parece improbable que la vida se hubiese originado en una atmósfera oxidante y no parece que la producción de nitratos inducida por relámpagos sea una fuente posible de nitrógeno biológicamente útil durante la pretendida evolución de los sistemas de fijación del nitrógeno. En una atmósfera oxidante, la vida –en el supuesto de que ya existiera– debió disponer de sistemas que reparasen los perjuicios causados por los subproductos de la fijación atmosférica del nitrógeno, pero es improbable que la vida haya evolucionado en primer lugar debido al impacto de algunos de esos subproductos.

Ello explicaría en parte por qué, a pesar de la significativa evidencia de lo contrario,[13] los guiones naturalistas del "origen de la

---

[12] La información sobre los estados de oxidación y la química del nitrógeno es fácilmente accesible. Un resumen útil se encuentra en WHITTEN, K. W.; GAILEY, K. D. *General Chemistry*. Filadelfia: Saunders College Publishing, pp. 658-666.

[13] Ver, por ejemplo: *a*) OHMOTO, H. (1996). «Evidence in pre-2.2 Ga paleosols for the early evolution of atmospheric oxygen and terrestrial biota». *Geology* 24: 1.135-1.138. *b*) WALTON, J. C. (1976). «The chemical composition of the Earth's original atmosphere». *Origins* 3 (edición en inglés): 66-84.

vida" comúnmente giran alrededor de atmósferas primordiales reductoras.[14] Es habitual que las composiciones atmosféricas propuestas contengan gases como amoniaco, metano, hidrógeno y vapor de agua. La investigación en la que intervienen atmósferas compuestas por distintas combinaciones de gases, pero siempre en ausencia de oxígeno, ha demostrado que cuando el aporte energético es suficiente se producen varias moléculas orgánicas, entre las cuales también se encuentran aminoácidos. Por tanto, en condiciones reductoras, la vida primitiva pudo adquirir aminoácidos sin recurrir a la fijación biológica del nitrógeno. El problema es que, si bien este guión podría explicar por qué los aminoácidos sirven como donantes de nitrógeno en los itinerarios bioquímicos anabólicos, sigue sin explicar la evolución del propio ciclo del nitrógeno. En el mejor de los casos, proporciona un paso superfluo del ciclo pero necesita la evolución de otros pasos para extraer el nitrógeno de las moléculas orgánicas y devolverlo a la atmósfera. De todas maneras, los problemas de la evolución bioquímica y la generación espontánea de la vida han sido objeto de tanta discusión que huelga toda repetición al respecto. Si el lector desea una visión general, puede acudir al capítulo sobre el experimento de Millar-Urey en *Icons of Evolution*, de Jonathan Well.[15]

La mayoría de los argumentos a favor de la evolución del ciclo del nitrógeno permiten la existencia de la vida previa al propio ciclo, pero se necesitan algunas fuentes de nitrógeno en la forma correcta para que pueda existir la vida. Este es un problema crucial. Si una atmósfera reductora provee los ladrillos nitrogenados de la vida, la fijación biológica del nitrógeno se vuelve innecesaria y plantea la cuestión de qué presión selectiva fue la "causa" de su evolución, al menos antes del paso de una atmósfera reductora a oxidante. Por

---

[14] Este sigue siendo el guión común de los libros de texto. Ver por ejemplo, en inglés, CAMPBELL, N. A.; REECE, J. B.; MITCHELL, L. G. (1999). *Biology*. Nueva York: Benjamin Cummings, 5ª ed., p. 492.

[15] WELLS, J. (2000). *Icons of Evolution: Science or Myth? Why Much of What We Teach About Evolution Is Wrong*. Washington, D.C.: Regnery Publishing, pp. 9-22.

otra parte, si bien se producen nitratos por medio del impacto térmico en una atmósfera oxidante, algunos mecanismos abióticos desconocidos tuvieron que reducir los nitratos a formas biológicamente útiles antes de la evolución de los mecanismos de asimilación biológica. Además, todas las moléculas orgánicas reducidas deben quedar al abrigo del O_3 y otros radicales libres, subproductos de la fijación atmosférica. En cualquier guión, la producción de la vida y la evolución de la fijación biológica del nitrógeno presentan enigmas que el mecanismo neodarwinista no resuelve de manera razonable.

Por más escenarios que se sugieran para vencer estas cuestiones, de hecho, ninguno resuelve el problema recurriendo a principios estrictamente darwinistas. Tomemos, por ejemplo, el siguiente escenario: la vida evolucionó en una atmósfera reductora que posteriormente cambió a oxidante. En esas nuevas circunstancias, algunas bacterias de los pocos organismos que sobrevivieron al cambio evolucionaron y desarrollaron la capacidad de usar el nitrógeno en forma de nitratos, por lo que desarrollaron la asimilación antes que apareciera la fijación biológica del nitrógeno. Este escenario presenta, entre otros, los siguientes problemas: 1) Presupone que la asimilación pueda evolucionar y asume sin reparos el hecho de que evolucionara antes de que fuera vital para sostener algunas bacterias a que también tenían la capacidad de sobrevivir en atmósferas oxidantes. 2) Presupone una fijación atmosférica a niveles suficientes para sostener la vida, pero no lo suficientemente rápida de modo que los nitratos se acumulasen hasta el punto de causar problemas. 3) Falta una prueba de la atmósfera reductora. 4) La necesidad simultánea de desarrollar un medio de afinación de los esqueletos de carbono para producir aminoácidos. 5) La necesidad simultánea de tratar los radicales producidos como una parte del proceso. 6) La disponibilidad de fuentes de energía y fuerza reductora suficiente para que la asimilación funcione.

Probablemente, la presuposición más perturbadora sea que algún organismo adaptado a vivir en un medioambiente reductor pudiera sobrevivir en la transición a un entorno oxidante. En última instancia, los guiones de este tipo se limitan a dividir un único gran problema en dos grandes problemas que el darwinismo debe expli-

car; no reducen el problema a pequeños pasos que la naturaleza, sin intervención exterior, pudiera dar de manera razonable mediante un proceso neodarwinista. Además, no explican la fijación biológica del nitrógeno, sino que, en su lugar, invocan distintos medios biológicos para obtener nitrógeno sin resolver la incógnita de la fijación del nitrógeno. Más adelante en este artículo se regresará a la discusión de la asimilación.

1D. Fijación biológica del nitrógeno: nitrógeno disponible en muchos hábitats

La fijación biológica del nitrógeno es el principal método natural[16] mediante el cual se pone el nitrógeno a disposición de los organismos vivos. Tal como ya se ha indicado, en los sistemas naturales, más del 90% del nitrógeno procede de la actividad biológica. La capacidad de fijar el nitrógeno está restringida a algunos microbios. Las bacterias (incluyendo las cianobacterias) que reducen el nitrógeno a amoniaco (NH_3) abarcan una serie de géneros y estilos de vida dispares, entre los cuales se incluyen, por ejemplo: *Azotobacter* (aeróbica), *Klebsiella* (anaerobio facultativo), *Rhodospirillum* fotosintética y aeróbica), *Clostridium* (de vida libre anaeróbica), *Nostoc* (cianobacteria de vida libre o simbiótica), *Frankia* (actinomiceto, simbionte de *Alnus*, los alisos), *Anabaena* (cianobacteria fotosintética, simbionte de *Azolla*, los helechos de agua, comunes en los arrozales)[17] y *Rhizobium* (simbiontes de las leguminosas). Los últimos cuatro géneros forman relaciones simbióticas con varios géneros de plantas aunque algunas especies puedan ser de vida libre. Aunque

[16] En la actualidad se fijan grandes cantidades de nitrógeno mediante procesos industriales y se emplean como fertilizantes. De ahí la expresión 'método natural'.

[17] PETERS, G. A.; MEEKS, J. C. (1989). «The Azolla-Anabaena Symbiosis: Basic Biology». *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40: 193-210.

se conocen varios ejemplos más,[18] el que goza de un mejor conocimiento de relación de mutua dependencia es la que las distintas razas y especies de *Rhizobium* mantienen con las distintas especies de leguminosas.

En el estómago de algunos herbívoros –por ejemplo, los erizos de mar[19] y las termitas[20]– se encuentran bacterias fijadoras de nitrógeno anaeróbicas. En algunos casos la contribución de dichas bacterias a las necesidades de nitrógeno de su huésped puede ser insignificante, mientras que en otros puede ser significativa. Las cianobacterias pueden formar relaciones simbióticas (en los líquenes, por ejemplo) pero allí donde son realmente importantes es como organismos de vida libre en un medioambiente marino o acuático. *Trichodesmium* es una cianobacteria marina fijadora de nitrógeno.[21]

La diversidad de las bacterias fijadoras de nitrógeno asegura que el nitrógeno esté disponible para los ocupantes de muchos hábitats distintos. Además, ilustra el argumento de este artículo según el cual el ciclo del nitrógeno no tiene que ver con una especie aislada, sino con los pasos de un itinerario ecoquímico. Por más que un paso sea ineludible, es posible que en un momento dado una especie no sea necesaria puesto que el mecanismo requerido para cumplimentar el paso –las enzimas implicadas– se pueden encontrar en

---

[18] Otros géneros de plantas que forman relaciones simbióticas con bacterias fijadoras de nitrógeno incluyen *Casaurina*, *Coriaria*, *Gunera*, *Myrica* y coníferas como *Cycas*, *Macrozamia* y *Podocarpus*.

[19] GUERINOT, M. L.; PATRIQUIN, D. G. (1981) «The association of N_2-fixing bacteria with sea urchins». *Marine Biology* 62: 197-207.

[20] Ver: *a*) PORTIKUS, C. J.; BREZNAK, J. A. (1977). «Nitrogen-fixing *Enterobacter aglomerans* isolated from guts of wood-eating termites». *Applied and Environmental Microbiology* 33: 392-399. *b*) EUTIK, M. L.; O'BRIEN, R. W.; SLAYTOR, M. (1978). «Bacteria from de Gut of the Australian Termites». *Applied and Environmental Microbiology* 35: 823-828.

[21] CAPONE, D. G.; ZEHR, J. P.; PAERL, H. W.; BERGMAN, B.; CARPENTER, E. J. (1997). «*Trichodesmium*, a Globally Significant marine Cyanobacterium». *Science* 276: 1.221-1.229.

otras especies aparentemente distantes, aunque todas ellas relacionadas. La redundancia es importante como medida de seguridad cuando las circunstancias hacen imposible la presencia de abundantes especies individuales que tienen las mismas capacidades. Los sistemas ecológicos están repletos de redundancias.

1E. Fijación biológica del nitrógeno – la nitrogenasa

Todas las bacterias fijadoras de nitrógeno producen nitrogenasa, la cual se compone de dos complejos proteicos cuyos aminoácidos contienen nitrógeno. La existencia de tales complejos proteicos necesita las mismas reacciones que catalizan. Cuando se combinan dos subunidades de nitrogenasa distintas procedentes de especies distintas, suelen formar "híbridos activos" con actividad de nitrogenasa.[22] Por consiguiente, incluso las nitrogenasas procedentes de especies muy distintas son comparables, aunque se hayan detectado algunas diferencias.[23] Este grado de similitud sugiere un origen similar a pesar de que, como ya se ha indicado, las bacterias fijadoras de nitrógeno ocupen un abanico de hábitats muy variado. En tales circunstancias, parece improbable que la evolución convergente haya producido complejos proteicos similares capaces de intercambiarse las piezas. La transferencia horizontal de genes puede ser la explicación evolucionista más prometedora a la distribución de la nitrogenasa en especies distintas.[24]

La expresión de la nitrogenasa se regula de manera reversible con lo que se llama la "desconexión de amoniaco".[25] Además, cuando los niveles de oxígeno son altos, la expresión de la nitroge-

---

[22] MOAT, A. G.; FOSTER, J. W. (1988). *Microbial Physiology*. 2ª ed. Nueva York: John Wiley & Sons, p. 258.

[23] Ibídem.

[24] RUVKUN, G. B.; AUSUBEL, F. M. (1980) «Interspecies homology of nitrogenase genes». *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 77: 191-195.

[25] MOAT, A. G.; FOSTER, J. W. *Op. cit.*, p. 261.

nasa puede ser reprimida mediante una compleja cascada de acontecimientos.[26] Si bien los complejos de nitrogenasa de las distintas especies son comparables, la regulación genética de la expresión de la nitrogenasa es muy distinta de un organismo a otro.[27] A ello se añade que las estrategias para proteger la nitrogenasa del oxígeno varían entre los organismos.

Las interacciones entre las plantas huésped y las bacterias *Rhizobium* en los nódulos de las raíces son especialmente íntimas y elegantes.[28] Cuando las concentraciones de compuestos de nitrógeno son elevadas en los brotes de la planta huésped, la actividad de la nitrogenasa se reduce. Es evidente que, cuando no se necesita más nitrógeno fijado, existe un medio de comunicación entre los brotes de la planta huésped y los bacteroides, células deformes de *Rhizobium* en los nódulos de la raíz.[29] Este es otro ejemplo de cooperación interespecífica que, en este caso, se cree que implica un aminoácido como inhibidor de la nitrogenasa.[30] La regulación a la baja de la actividad de la nitrogenasa es necesaria a causa de su elevada exigencia energética y la naturaleza reactiva de su producto, el amoniaco. En condiciones normales, el amoniaco libre está casi ausente y se usa inmediatamente para producir el aminoácido glutamato y, de ese modo, queda aislado en un depósito de glutamato.

---

[26] HILL, S. (1988) «How is nitrogenase regulated by oxygen?». *FEMS Microbiology Review* 54: 111-130.

[27] MOAT, A. G.; FOSTER, J. W. *Op. cit.*, p. 257.

[28] BERINGER, J. E.; BREWIN, N.; JOHNSTON, A. W. B.; SCHULMAN, H. M.; HOPWOOD, D. A. (1979) «The Rhizobium-Legume Symbiosis». *Proceedings of the Royal Society of London* Series B 204: 219-233.

[29] DELVES, A. C.; MATHEWS, A.; DAY, D. A.; CARTER, A. S.; CARROLL, B. J.; GRESSHOFF, P. M. (1986). «Regulation of the soybean-*Rhizobium* nodule symbiosis by shoot and root factors». *Plant Physiology* 82: 588-590.

[30] SCHULZE, J. (2003). «Source-sink manipulations suggest an N-feedback mechanism for the drop in N_2 fixation during pod-filling in pea and broad bean». *Journal of Plant Physiology* 160: 521-537.

Es de destacar que en todos los casos el oxígeno actúa como un veneno para la enzima nitrogenasa. Si la fijación del nitrógeno hubiese evolucionado en una atmósfera reductora, ello tendría sentido, pero una atmósfera reductora eliminaría la necesidad de la fijación del nitrógeno ya que el nitrógeno estaría disponible libremente a través de los aminoácidos de origen abiótico y como amoniaco. Por lo tanto, cuesta concebir una presión selectiva para desarrollar la fijación del nitrógeno, especialmente si se consideran sus exigencias energéticas. Como consecuencia, la sensibilidad de la nitrogenasa al oxígeno plantea un rompecabezas; en una atmósfera reductora la fijación del nitrógeno no evolucionaría, a la vez que en una atmósfera oxidante la nitrogenasa no funciona.

Evitar el problema con el recurso de una atmósfera neutra no lo resuelve y presenta las peores características de ambas opciones. Por una parte, se desconoce si las atmósferas neutras producen moléculas nitrogenadas, esenciales para la vida; y por otra, el oxígeno estaría aún en concentraciones suficientemente elevadas como para envenenar la nitrogenasa. En esas circunstancias, la fijación del nitrógeno debería evolucionar para favorecer la vida antes de la aparición de la vida misma, una verdadera sinrazón evolucionista. Además, algunos mecanismos para aislar la nitrogenasa todavía precisarían evolucionar para protegerla de los niveles relativamente bajos de oxígeno presente en una atmósfera de ese tipo. Un itinerario más simple y directo sería la evolución de una nitrogenasa menos sensible al oxígeno. Queda claro que la evolución de la nitrogenasa en una atmósfera reductora o neutra no explica bien su sensibilidad al oxígeno. Ello sugiere que es posible que haya una restricción de diseño necesaria que deberá ser buscada en la nitrogenasa, al tiempo que puede ser la verdadera explicación de su sensibilidad al oxígeno.

Todos los organismos que fijan nitrógeno recurren a algún mecanismo que asegure las condiciones anaeróbicas. Un notable ejemplo es la leghemoglobina, presente en los nódulos de las raíces de las leguminosas, cuya afinidad por el oxígeno es aún mayor que la hemoglobina de los mamíferos. La construcción de la molécula de leghemoglobina es un proceso cooperativo. Los genes de la legu-

minosa determinan la porción de globina de la molécula, mientras que el anillo de porfirina procede de *Rhizobium*.[31] Sin embargo, el ión central de hierro del anillo de porfirina procede de la planta. Es claro que la producción de leghemoglobina necesita una coordinación exacta entre ambas especies. Las síntesis cooperativas desafían las explicaciones darwinistas y son otro ejemplo posible de un sistema con características similares a la complejidad irreducible que abarca múltiples especies.

La mayor parte de la fijación biológica se consigue con bacterias simbióticas y cianobacterias fotosintéticas fijadoras de nitrógeno.[32] Se considera que la fijación del nitrógeno en las bacterias de vida libre del suelo es relativamente baja como resultado de su limitado acceso a fuentes de energía. Por consiguiente, las poblaciones de tales bacterias también son bajas.[33] Aun así, cerca de las raíces, en una zona denominada "rizosfera", en la que pueden tener acceso a los nutrientes de producción fotosintética exudados, pueden ser más numerosas. Sin embargo, en palabras de Moat y Foster, «aunque, por lo general, los organismos de vida libre parecen menos eficientes en la fijación del nitrógeno, su número, su variedad y su distribución general sugieren que su importancia ecológica es primordial».[34]

1F. Fijación biológica del nitrógeno y fotosíntesis

La fijación biológica del nitrógeno necesita hidrógeno y grandes cantidades de energía procedente del ATP. La reacción se presenta en la siguiente fórmula:

---

[31] VOET, D.; VOET, D. G. (1990). *Biochemistry.* Nueva York: John Wiley & Sons, p. 726.

[32] MOAT, A. G.; FOSTER, J. W. *Op. cit.*, p. 252.

[33] HUBEL, D. H.; KIDDER, G. *Biological Nitrogen Fixation*. Universidad de Florida IFAS Extensión SL16, p. 3.

[34] MOAT, A. G.; FOSTER, J. W. *Op. cit.*, p. 254.

$N_2 + 8H^+ + 8e^- + 16ATP = 2NH_3 + H_2 + 16ADP + 16P_i$

Es notable la ausencia de una reducción química paso a paso en la que los óxidos de nitrógeno se empleen como eslabones intermedios de un itinerario para la fijación del nitrógeno. Ello obstaculiza el itinerario que usa la asimilación para reducir los nitratos como punto de apoyo hacia la evolución de la fijación del nitrógeno tal y como se observa en la actualidad. En su lugar, la reducción de N_2 catalizada por la nitrogenasa involucra esta compleja máquina proteica que transfiere electrones directamente al N_2 en un proceso paso a paso.[35]

$N{\equiv}N \rightarrow H\text{-}N{=}N\text{-}H \rightarrow H_2N\text{-}NH_2 \rightarrow 2NH_3$

Por improbable que parezca, la suma de la energía libre de Gibbs (G) de estas reacciones es de -79,0 kJ/mol.[36] En otras palabras, la conversión de N_2 en amoniaco es exergónica. Entre otras cosas, la necesidad de energía surge del coste de proporcionar hidrógeno y electrones a la reacción. Esa energía procede del ATP que se puede formar, directa o indirectamente, en la fotosíntesis y, más raramente, la quimiosíntesis. Moat y Foster[37] destacan que la capacidad fotosintética de las plantas puede ser un factor limitador para la fijación del nitrógeno. Se calcula que en la fijación del nitrógeno se emplea hasta un 20% del ATP producido en la fotosíntesis.[38] En las leguminosas, la fijación de 1 mg de nitrógeno necesita 4 mg de carbono fijado procedente de la planta huésped.[39] Es evidente que existe una relación necesaria entre la fotosíntesis o la quimiosíntesis para aportar energía a la fijación biológica del nitrógeno y su gran exigencia energética. Además, el ATP contiene una

---

[35] VOET, D. ; VOET, J. G. *Op. cit.*, p. 726.

[36] SPRENT, J. I. (1987), *Cambridge Studies in Ecology: the ecology of the nitrogen cycle*. Cambridge: Cambridge University, p. 11.

[37] MOAT, A. G.; FOSTER, J. W. *Op. cit.* p. 254.

[38] VOET, D. ; VOET, J. G. *Op. cit.*, p. 727.

[39] WAREMBOURG, F. R.; ROUMET, C. (1989) «Why and how to estimate the cost of symbiotic N_2 fixation? A progressive approach based on the use of ^{14}C and ^{15}N isotopes». *Plant and soil* 115: 167-177.

base nitrogenada, cuyo nitrógeno tiene un origen directamente trazable en el ciclo del nitrógeno.

Los simbiontes *Rhizobium* tienen un acceso directo a la energía química de la fotosíntesis de la planta huésped, pero las bacterias de vida libre dependen de la energía que proporcionan sus propios procesos fotosintéticos (cianobacterias) o, si no son fotosintéticas, de la respiración y la fermentación de moléculas orgánicas derivadas reducidas mediante la fotosíntesis absorbidas del suelo, principalmente en la rizosfera. Por tanto, las relaciones del ciclo del nitrógeno son complejas y obligatorias, aun para las especies de vida libre.

1G. ¿La fijación biológica del nitrógeno es indispensable e ineludible?

Sin duda alguna, la fijación biológica del nitrógeno no es un proceso sencillo y un argumento en favor del diseño se podría basar en este único paso del ciclo del nitrógeno. Es improbable que se haya producido mediante un proceso darwiniano paso a paso porque la misma nitrogenasa es inmensamente compleja, necesita mecanismos auxiliares complejos para mantener una tensión del oxígeno baja y también requiere sustratos y cadenas de carbono susceptibles de aminación para almacenar amoniaco en forma de glutamina. Además, se precisan mecanismos reguladores que coordinen toda la actividad de consumo de energía y su producto químicamente reactivo, el amoniaco.

Junto a la pregunta de si la fijación biológica se pudo originar de manera gradual, y de la misma importancia, surge la cuestión de si se conocen procesos abióticos naturales –como la fijación atmosférica del nitrógeno– que puedan proveer una vía alternativa a este paso del ciclo. Tal como ya se ha discutido, la respuesta en el caso de la fijación atmosférica es que el producto –los nitratos– no son aprovechables directamente y que los estados químicos intermedios de la producción de nitratos son destructivos para las moléculas orgánicas, así como el mismo nitrato cuando se encuentra en forma

de ácido nítrico. La asimilación de los nitratos necesita un mecanismo separado y dependiente de la fotosíntesis, al menos en las plantas, que solo se podría desarrollar en ausencia de proteínas nitrogenadas.

Una de las contribuciones más prometedoras sería el amoniaco expelido por los volcanes, pero en la actualidad los volcanes no emiten grandes cantidades de amoniaco.[40] Incluso si lo hicieran, surge un problema secundario del hecho de que el amoniaco es destruido rápidamente por fotólisis. Su alta solubilidad puede impedir que la luz rompa una parte de amoniaco, pero grandes cantidades de amoniaco disueltas en agua podrían aumentar el pH y causar un impacto en la química del agua de manera que la vida se viera amenazada. Sea cual sea la fuente abiótica de amoniaco, tanto si se trata de los volcanes, de una atmósfera reductora o de cualquier otra fuente, ninguna de ellas es una alternativa válida a la fijación biológica del nitrógeno ya que, si la naturaleza proporcionase nitrógeno de manera abundante en forma de amonio o aminoácidos, la presión selectiva en favor de un proceso como la fijación del nitrógeno parece improbable.

2A. Nitrificación

Las plantas, a través de las raíces o los nódulos de las raíces, toman una parte del amonio producido en la fijación del nitrógeno, así como en la amonificación (todavía por discutir), y lo asimilan. Sin embargo, grandes cantidades de amoniaco también se convierten en nitritos y nitratos, un proceso conocido generalmente como nitrificación. Muchas plantas absorben el nitrógeno, preferentemente, en forma de nitratos (NO_3^-). No obstante, en condiciones desfavorables para la nitrificación (pH bajo, suelos anaeróbicos, etc.), las plantas recurren al amoniaco. El uso del amoniaco como fuente

[40] MILLER, C. D. (1989) «Potential Hazards from Future Volcanic Eruptions in California». *U.S. Geological Survey Bulletin* 1847.

primaria de nitrógeno tiende a reducir el pH del suelo.[41] Aun en condiciones desfavorables, todavía se produce nitrificación, aunque en tasas menores.[42] Las plantas acuáticas absorben el amoniaco a través de las hojas.

Nos referimos a los organismos que convierten el amoniaco en nitritos y nitratos (en gran parte, bacterias) como nitrificadores. Se encuentran en gran variedad de medioambientes: suelos, agua marina, aguas salobres, ríos, lagos, estanques de tratamiento de aguas residuales, etcétera. Junto con otros géneros, *Nitrosomonas* convierte el amoniaco en nitritos (NO_2^-). Por lo general, los organismos que únicamente oxidan el nitrógeno a nitritos reciben el nombre de oxidantes de amoniaco. Los nitritos se oxidan rápidamente, por lo que las plantas pueden aprovechar tan solo una pequeña cantidad. Puesto que los nitritos son tóxicos, su rápida conversión en nitratos los destoxifica, a la vez que es beneficiosa tanto para los organismos que absorben nitratos como para las bacterias que aprovechan la energía liberada en el proceso.

Nitrobacter y otros géneros oxidan los nitritos a nitratos.[43] Todos los nitrificadores son aeróbicos y la mayoría son quimioautotróficos; es decir, la energía liberada en la nitrificación se aprovecha para la fijación del carbono. Algunos nitrificadores son heterotróficos, por ejemplo, en los desechos forestales, los encargados de la mayor parte de la nitrificación no son las bacterias, sino los hongos saprofitos.[44]

---

[41] NYE, P. H. (1981) «Changes of pH across the rhizosphere induced by roots». *Plant and Soil* 61: 7-26.

[42] Ver: *a*) ROBERTSON, G. P. (1982) «Nitrification in forested ecosystems». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 296: 445-457. *b*) DE BOER, W.; KOWALCHUK G. A. (2001) «Nitrification in acid soils: micro-organisms and mechanisms». *Soil Biology & Biochemistry* 33: 853-866.

[43] POSTGATE, J. (1998). «Genetics and Evolution». En: POSTGATE, J. *Nitrogen Fixation*. 3ª ed. Cambridge: Cambridge University, pp. 79-99.

[44] LANG, E.; JAGNOW, G. (1986). «Fungi of a forest soil nitrifying and low pH values». *FEMS Microbiology Letters* 38 (5): 257.

Tal como ya se ha indicado, la nitrificación es un proceso en dos pasos. El primero, que emplea la enzima monoxigenasa del amoniaco, se da según las siguientes fórmulas:

$NH_4^+ + 1/2O_2 \rightarrow NH_2OH + H^+$

$NH_2OH + O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O + H^+$

En esta reacción inicial de la nitrificación se liberan 66 kcal por mol de amoniaco oxidado. En condiciones de escasez de oxígeno, en lugar de nitrito, el producto es N_2O (óxido nitroso).

El segundo paso es como sigue:

$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^+$

Este paso libera 18 kcal por mol de nitrito oxidado.

¿Por qué la nitrificación es esencial para el ciclo del nitrógeno cuando las plantas y las bacterias son capaces de usar amoniaco directamente? De hecho, incluso los nitratos deben ser reducidos a amoniaco antes de ser biológicamente accesibles. Que algunos organismos lleguen a tener el sistema enzimático que los capacita para usar los nitratos cuando está disponible la alternativa más simple de emplear directamente el amoniaco dice mucho sobre la evidente importancia de la vía más larga para el nitrógeno.

En su calidad de quimioautótrofos, los nitrificadores fijan carbono y lo ponen a disposición de la respiración. Sin embargo, el proceso no es muy eficiente. Una respuesta más razonable se sugiere en la definición de la función del ciclo del nitrógeno tal como se estableció más atrás en este artículo: «Regular la concentración de varias moléculas que contienen nitrógeno en el medioambiente, de manera que la vida pueda subsistir». Por tres razones, la conversión del amoniaco en nitratos es una pieza esencial de la función del ciclo a la hora de regular distintas moléculas nitrogenadas:

1. Impide la acumulación de amoniaco a niveles tóxicos.
2. Proporciona una reserva de nitrógeno disponible para la vida, aunque relativamente inerte, para poder ser utilizada sin necesitar los complejos y energéticamente costosos mecanismos empleados en la fijación del nitrógeno.
3. La solubilidad de los nitratos en agua les permite ser relativamente móviles, y de este modo distribuir nitrógeno biológi-

camente disponible para aquellos organismos que carecen de la capacidad de fijar su propio nitrógeno.

La nitrificación es, por lo tanto, un paso esencial en el reciclado del nitrógeno de regreso a la atmósfera y desempeña un papel vital en la función global del ciclo del nitrógeno a la hora de regular las moléculas nitrogenadas del medioambiente. Merece la pena destacar que esta comprensión del papel y la necesidad de la nitrificación surgen de la visión orientada por el diseño del ciclo del nitrógeno y no como una visión reduccionista de la naturaleza.

2B. ¿La nitrificación es indispensable e ineludible?

El total de nitrógeno de la atmósfera alcanza la cifra de 3,85 x 10^{21} g.[45] Se ha calculado que antes de que la acción humana interviniera de manera significativa en el proceso, la fijación biológica alcanzaba una cifra de 90-140 Tg al año.[46] Con tales tasas de fijación, en teo-

---

[45] Según la entrada «Air» (p. 55) de la *Van Nostrand's Scientific Encyclopedia*. 6ª ed. (CONSIDINE, D. M. [ed.]. [1983]. Nueva York: Van Nostrand Reinhold Company), un 75,54% en peso del aire es nitrógeno, mientras que la masa total de la atmósfera es de 5,1 x 10^{23}, lo que da una masa total de N_2 atmosférico de 0,7554 x 5,1x10^{21} g = 3,85 x 10^{21} g. Nótese que aquí no se incluye el nitrógeno disuelto en los océanos y que la considerablemente menor cifra de 4 x 10^{18} g es la propuesta de WEAST, R. C. (ed.). (1984). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 64ª ed. Boca Raton (Florida): CRC, p. B-23. Nótese que Galloway *et al.* (GALLOWAY, J. N.; ABER, J. D.; ERISMAN, J. W.; SEITZINGER, S. P.; HOWARTH, R. W.; COWLING, E. B.; COSBY, B. J. [2003] «The Nitrogen Cascade». *BioScience* 53: 341-356) parecen indicar una cifra ligeramente superior y afirman que la tierra, incluida su atmósfera, contiene un total de 4 x 10^{21} g de N_2, del cual, un 99% es N_2 atmosférico. La referencia que dan es MACKENZIE, F. T. (1998). *Our Changing Planet: An Introduction to Earth System Science and Global Environmental Change*. 2ª ed. Upper Saddle River (Nueva Jersey): Prentice-Hall.

[46] VITOUSEK, P. M.; ABER, J.; HOWARTH, R. W.; LIKENS, G. E.; MATSON, P. A.; SCHINDLER, D. W.; SCHLESINGER, W. H.; TILMAN, G. D. (1997) «Human Al-

ría, bastarían de 27 a 43 millones de años para que se fijara todo el nitrógeno atmosférico. Este cálculo no incluye la relativamente pequeña cantidad de nitrógeno fijado en el pasado por medio del impacto térmico, lo que, de algún modo, acortaría ese tiempo. Puesto que las tasas de fijación de nitrógeno actuales son significativamente mayores debido al cultivo intensivo de leguminosas, la fijación industrial y la combustión industrial entre otros factores, el número de años, según la tasa actual, sería considerablemente menor. Pero ese intervalo de tiempo no se entendería como literalmente cierto porque otros factores como el nitrógeno disuelto en el agua y la fotólisis del amoniaco no se tienen en consideración. Lo que estimaciones como esta demuestran es que sería de esperar que la Tierra se volviese muy inadecuada para la vida a causa de la acumulación de amoniaco en un intervalo de tiempo que la perspectiva darwiniana considera demasiado corto. Ello ilustra la necesidad de una vía de regreso para eliminar el exceso de nitrógeno. En la medida en que la nitrificación es un paso de dicho proceso, es indispensable.

¿Cómo se explica la aparición de un proceso como la nitrificación mediante la selección darwiniana? ¿Cómo es posible evitarlo de manera natural? En un entorno reductor en el que la fijación del nitrógeno es innecesaria, el proceso inverso también sería innecesario. Aun así, parece improbable; todavía sería necesario reciclar el nitrógeno incorporado a los organismos cuando estos lo excretasen como un producto de desecho o después de su muerte. Pero esto se podría conseguir mediante itinerarios en los que el nitrógeno pudiese ser liberado a partir de los aminoácidos. Por ejemplo, si el nitrógeno procedente de los aminoácidos se reciclara en amoniaco, al igual que ocurre con la desaminación del glutamato mediante la glutamato deshidrogenasa, ello impediría la acumulación infinita de aminoácidos. Sea cual sea el mecanismo, en un entorno reductor parece improbable que la “nitrificación” haya evolucionado para ser

teration of the Global Nitrogen Cycle: Causes and Consequences». *Issues in Ecology - Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle* 1: 1-16.

algo parecido al proceso oxidativo de nitrificación que hoy conocemos.

Una atmósfera oxidante presenta una situación interesante. En presencia de oxígeno, el amoniaco arde con facilidad y produce óxidos de nitrógeno y agua. Además, incluso a concentraciones relativamente bajas, el amoniaco es tóxico para la vida. En ausencia de enzimas de seres vivos y en concentraciones bajas, el amoniaco no se oxida espontáneamente en óxidos de nitrógeno y agua a un ritmo significativo. En una atmósfera oxidante, sin nitrificación, sería de esperar que el amoniaco se acumulase en el medioambiente hasta que sucediera una de las dos siguientes posibilidades (o posiblemente ambas):

1. El equilibrio entre la producción amónica de origen orgánico y la degradación inorgánica del amoniaco se alcanzaría; lo que, en potencia, provocaría unas concentraciones de amonio incompatibles con la vida.
2. Un relámpago, o cualquier otra chispa, desencadenaría una oxidación catastrófica.

La última posibilidad es improbable, dada la solubilidad del amoniaco en el agua. De manera más razonable, el amoniaco se podría acumular de manera paulatina en las grandes extensiones de agua, aumentando su pH y convirtiéndolas en un medio alcalino. Esto presupone que la fotólisis del amoniaco en la atmósfera no lo rompe a una velocidad suficientemente elevada para obstaculizar su acumulación. En el mundo actual, no se da ninguna de esos escenarios porque la nitrificación limita la acumulación de amonio, aunque permite los organismos reciban un aporte de nitrógeno en la forma relativamente inerte de los nitratos.

Para evitar los problemas que resultan de la ausencia de nitrificación, se debería reciclar el amoniaco en material vivo como sucede en los bosques hasta que cualquier otro nutriente limitador impidiera el crecimiento. Sería de esperar que, a medida que los organismos muriesen y los otros nutrientes limitadores se reciclasen, la biomasa se fuera acumulando hasta que alguna deflagración consumiese todo el nitrógeno y lo devolviese a la atmósfera en forma de óxidos de nitrógeno. Tanto el óxido nítrico (NO) como el di-

óxido de nitrógeno (NO_2) son gases altamente reactivos y peligrosos para la vida. Por eso no sería extraño suponer que la biomasa se acumulase hasta superar un punto crítico y, al menos a escala local, destruyera la vida. La nitrificación impide este desenlace transformando el exceso de amoniaco a una molécula relativamente benigna, un nitrato, que también puede ser aprovechada por las plantas o, como alternativa, continuar con la desnitrificación mediante la cual se devuelve a la atmósfera como N_2, un gas inerte y seguro.

3A. Desnitrificación[47]

La desnitrificación es un proceso respiratorio microbiológico mediante el cual los nitratos se reducen al gas atmosférico nitrógeno (N_2) u óxido nitroso (N_2O). Sin este proceso, los nitratos se acumularían en altas concentraciones, según se ha visto en los últimos años a causa del abuso de fertilizantes nitrogenados. A escala mundial, en ausencia de desnitrificación y una asimilación suficientemente rápida por parte de plantas y microbios, los nitratos aumentarían paulatinamente y acidificarían las grandes masas de agua a la vez que la concentración de nitrógeno atmosférico declinaría. De hecho, se ha propuesto un mecanismo similar a este para explicar la concentración de nitrógeno inesperadamente baja de la atmósfera marciana.[48] En el actual estado de cosas, en condiciones normales terrestres, el nitrógeno a menudo está limitado en la biosfera como resultado de unos bajos niveles de fijación de nitrógeno acompañados de la desnitrificación.[49]

---

[47] KNOWLES, R. (1982) «Denitrification». *Microbiological Reviews* 46: 43-70.

[48] MANCINELLI, R. L.; BANIN, A. (2003). «Where is the nitrogen on Mars?». *International Journal of Astrobiology* 2 (3): 217-225.

[49] VITOUSEK, P. M.; HOWARTH, R. W. (1991). «Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur?». *Biogeochemistry* 13: 87-115.

Los organismos del suelo necesitan oxígeno, pero si el suelo está empapado de agua durante un extenso período de tiempo (más de 36 horas) y el agua llena los espacios que quedan entre las partículas del suelo ocupadas habitualmente por el aire, el oxígeno queda excluido. En tales ocasiones, algunos microbios son capaces de obtener el oxígeno esencial a partir de los nitratos y los nitritos. El oxígeno de los nitratos sirve como un receptor de electrones alternativo.[50] El proceso se da según la siguiente fórmula:

$$2\ NO_3^- + 12\ H^+ + 10\ e^- \rightarrow N_2 + 6\ H_2O$$

Otra manera de representar el proceso es:

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$$

Los dos últimos productos, el óxido nitroso y el nitrógeno, son devueltos a la atmósfera. Entre los factores que influyen en la desnitrificación se encuentran: la cantidad de material orgánico disponible, los niveles de nitratos en el suelo y el pH. Por ejemplo, la desnitrificación es mayor durante el verano, cuando las temperaturas del agua son más elevadas.

En condiciones normales, la saturación de agua induce la desnitrificación, y esta se da a una tasa favorable al bienestar medioambiental. Pero cuando hay una sobrecarga de nitratos, las tasas de desnitrificación más elevadas que pueden ser alcanzadas no bastan para satisfacer la demanda y, de esa manera, los nitratos pueden ser transportados hacia las aguas freáticas y los acuíferos. La consecuencia es la eutrofización de las aguas superficiales en las que los organismos crecen de manera tan rápida que el oxígeno se agota y causa la muerte de muchos organismos. En última instancia, esto puede llevar a tasas exageradas de desnitrificación si los nitratos se convierten en los receptores de electrones más abundantes. Por tanto, aunque el sistema esté alterado, está diseñado para seguir funcionando y rectificar la alteración.

[50] KOROM, S. F. (1992). «Natural Denitrification in the Saturated Zone: A Review». *Water Resources Research* 28: 1.657-1.668.

3B. ¿La desnitrificación es indispensable e ineludible?

La necesidad de la desnitrificación es evidente cuando la lógica aplicada a la nitrificación también se aplica a este paso. Si bien los nitratos son susceptibles de ser reciclados como material vegetal, la heterogeneidad de la naturaleza y la falta de mecanismos de transporte de nitratos suficientemente rápidos hacen inevitable que, al menos a nivel local, las concentraciones puedan alcanzar niveles elevados. Aunque los nitratos permanecen relativamente inmóviles en ausencia de agua, son solubles en agua y pueden ser arrastrados hacia las grandes masas acuosas y alcanzar concentraciones destacables. El exceso de nitratos, en potencia, es causa de daños medioambientales tal como han puesto en evidencia las consecuencias del abuso de nitrógeno fijado industrialmente con fines agrícolas. En las condiciones actuales, si la desnitrificación no formara parte del ciclo del nitrógeno, aun con las tasas de fijación de nitrógeno y nitrificación naturales, los niveles de nitratos acabarían por volverse excesivos.

Comparándolos con otros óxidos de nitrógeno, los nitratos son relativamente estables y su tasa de degradación espontánea en O_2 y N_2 o N_2O no es apreciable. En una atmósfera oxidante, los nitratos se producen a través de la fijación atmosférica, en la cual las descargas eléctricas proporcionan una parte importante de la energía que alimenta la reacción. Según las tasas actuales, al año se fijan como nitratos,[51] aproximadamente, entre 3 y 5 x 10^{12} g mediante la fijación atmosférica, lo que significa que, en ausencia de fijación biológica de nitrógeno y desnitrificación, en teoría todo el nitrógeno atmosférico quedaría fijado como óxidos de nitrógeno en aproximadamente mil millones de años.[52] Una vez más, esta cifra solo pretende ser ilustrativa más que literal, ya que no tiene en cuenta, entre otros factores, las reacciones inversas y el impacto de las concen-

---

[51] GALLOWAY, J. N. *et al. Op. cit.*

[52] (1 año/3 x 10^{12} g)·(3,85 x 10^{21} g) = 1,3 x 10^{9} años; (1 año/5 x 10^{12} g)·(3,85 x 10^{21} g) = 0,77 x 10^{9} años.

traciones de nitrógeno reducido y oxígeno en la atmósfera. Además, solo considera los procesos abióticos. Si se diera la nitrificación biológica, la acumulación sería significativamente más rápida. La asimilación no funciona como una manera realista de eliminar el nitrato porque tan solo lo recicla hacia las plantas. Puesto que la fijación biológica del nitrógeno lo toma de la naturaleza y lo introduce en el ciclo del nitrógeno, se precisa un modo de eliminarlo.

En ausencia de desnitrificación biológica, la acumulación de nitratos debería ser cada vez mayor. Esto es exactamente lo que ocurre en el desierto de Atacama, al norte de Chile, que se encuentra entre las áreas más secas de la Tierra.[53] La pluviometría media se encuentra entre 1 y 2 mm al año. A ello se une que cuando cae la lluvia, se drena rápidamente porque no hay suelos que puedan quedar empapados. En esta árida región raramente se dan las condiciones necesarias para la desnitrificación. Por ello no resulta sorprendente que, al igual que sucede en otros desiertos, se hayan acumulado los nitratos. Pero, a diferencia de los otros desiertos, este es el único lugar conocido de la Tierra en que los nitratos se han acumulado hasta el punto de que su extracción minera es económicamente rentable.

Aunque el debate sobre la fuente de nitratos del desierto de Atacama sigue abierto, no es relevante para la cuestión de si en ausencia de desnitrificación se acumularían los nitratos. La respuesta es clara: sí. Sin embargo, merece la pena destacar que las medidas de la composición isotópica del oxígeno de esos nitratos sugieren que una proporción destacada se acumuló durante los últimos 2.000.000 de años como resultado de una deposición atmosférica a consecuencia de una fijación fotoquímica en las capas superiores de la atmósfera.[54] Por tanto, en ausencia de desnitrificación, parece

---

[53] ERICKSEN, G. E. (1983) «The Chilean nitrate deposits». *American Scientist* 71: 366-374.

[54] MICHALSKI, G.; BÖHLKE, J. K.; THIEMENS, M. (2004). «Long term atmospheric depositions as the source of nitrate and other salts in the Atacama Desert, Chile:

que los nitratos se acumulan como resultado de procesos abióticos. Tal como se ha mencionado previamente, los bajos niveles de nitrógeno atmosférico de Marte pueden ser atribuibles, en parte, a la acumulación de nitratos en el regolito marciano, en el que no se cree que exista un ciclo biológico del nitrógeno.

Para este paso del ciclo del nitrógeno sería concebible un escenario darwinista si se partiera de ciertas presuposiciones. Entre ellas se incluye la existencia de bacterias aeróbicas –un mecanismo de acumulación de nitratos– y nichos, tales como suelos de los cuales se haya excluido ocasionalmente el oxígeno. En este escenario algunas bacterias aeróbicas pueden tener poca capacidad de usar los nitratos en lugar del oxígeno como receptores de electrones durante la respiración. Quizá esto esté relacionado con su capacidad de utilizar los nitratos como fuente de nitrógeno y reducirlo a amoniaco para producir aminoácidos. La acción de la selección natural sobre esas bacterias que en los períodos de escasez de oxígeno sobrevivieron mejor que aquellas que dependen por completo del oxígeno debió acabar por producir las bacterias desnitrificadoras actuales.

Este escenario presenta varios problemas. El primero es el obvio recurso a lo desconocido. ¿En un pasado anterior al pleno desarrollo del ciclo del nitrógeno hubo bacterias capaces de utilizar nitratos como receptores de electrones durante la respiración? No hay prueba que apoye esta idea y existe una inmensa falta de pruebas de que los nitratos se hubiesen acumulado significativamente en el medioambiente. La manera como los organismos asimilan los nitratos –que discutiremos en la próxima sección– y adoptan la respiración por nitratos tampoco sugiere vínculo alguno entre ambos procesos. En esos organismos se producen dos importantes nitrato reductasas.[55] Por ejemplo, en *E. coli*, la enzima respiratoria está particulada y sensible al oxígeno, mientras que la enzima asimilatoria es soluble y ambas enzimas son inducidas y reprimidas por dis-

---

new evidence from mass-independent oxygen isotopic compositions». *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68: 4.023-4.038.

[55] MOAT, A. G.; FOSTER, J. W. *Op. cit.*, pp. 263-265.

tintos sustratos. Evidentemente, los procesos de respiración por nitratos y la asimilación de nitratos son bioquímicamente distintos y no muestran el tipo de convergencia necesaria para apoyar la teoría de que comparten una historia evolutiva relacionada.

Los sistemas reductores de nitrógeno en evolución en un medioambiente reductor carecen de sentido, dada la falta de nitrógeno oxidado en tales ambientes. En un medioambiente oxidante, aun en ausencia de fijación biológica o nitrificación, la presencia de nitratos es probable. De hecho, presumiblemente serían la única fuente de nitrógeno para los organismos que carecieran de capacidad para ejecutar los pasos que no fueran la asimilación y la aminación en el ciclo del nitrógeno. Suponiendo que tal fuera el caso, el problema último del reciclado del nitrógeno hacia la atmósfera quedaría temporalmente suprimido con la acumulación de nitrógeno en los organismos vivos y sus subproductos. Pero ello no niega la necesidad última de reciclar el nitrógeno hacia la atmósfera e incluso podría empeorarla una vez que el nitrógeno en forma de amoniaco o nitratos alcanzase niveles excesivos. Entonces se plantea la pregunta de si esa absorción biológica daría tiempo suficiente para una evolución paso a paso del resto de componentes del ciclo. En última instancia, la desnitrificación parece ser un punto indispensable del ciclo del nitrógeno y es improbable que haya evolucionado según los patrones darwinistas y de manera independiente del resto del ciclo.

4A. Asimilación[56]

Los nitratos tienen la función de encrucijadas principales en el ciclo del nitrógeno. Como ya se ha discutido, los nitratos se producen por medio de la nitrificación biológica y la fijación abiótica atmosférica

[56] Si se desea una visión general reciente sobre la asimilación del nitrógeno, ver OAKS, A. (1992) «Re-Evaluation of Nitrogen Assimilation in Roots». *BioScience* 42: 103-111.

del nitrógeno. Una vez ha alcanzado la forma de nitratos, el nitrógeno puede volver a la atmósfera como N_2 durante la desnitrificación o puede ser asimilado por las plantas y las bacterias. Aunque la asimilación se dé con rapidez, la única forma en que los nitratos pueden ser utilizados es como amoniaco. El proceso de la asimilación del nitrógeno incluye la conversión de los nitratos en amoniaco y la incorporación de ese amoniaco a los aminoácidos.

Los nitratos entran en las células de las plantas a través de un "cotransportador de protones y nitratos".[57] Una vez en las células de la planta, la enzima nitrato reductasa convierte los nitratos en nitritos. Los nitritos, un metabolito altamente tóxico del proceso, quedan atrapados en los cloroplastos y de esa manera la planta queda protegida de cualquier daño. Dentro de los plastos, otra enzima, la nitrito reductasa, convierte los nitritos en amoniaco. Es significativo que en al menos algunas plantas la energía de este proceso de reducción proviene de la fotorrespiración que, a su vez, depende de la presencia de oxígeno.[58] En la mayoría de los organismos, la asimilación es reprimida por la presencia de amoniaco e inducida por los nitratos o los nitritos.[59]

La asimilación microbiana del amoniaco para producir aminoácidos se da, primero, por medio de la síntesis de glutamato, alanina o aspartato[60] que, a su vez, sirven de donantes de nitrógeno a través de las transaminasas para formar otros aminoácidos. El amoniaco puede ser usado, por ejemplo, para aminar el glutamato y producir el aminoácido glutamina mediante la enzima glutamina sintetasa (GS) y ATP. GS es el medio principal a través del cual el amoniaco

---

[57] En este mecanismo, los protones y los nitratos son cotransportados a través de la membrana de las raíces aprovechando el aporte energético de la alta concentración de protones fuera de las mismas.

[58] RACHMILEVITCH, S.; COUSINS, A. B.; BLOOM, A. J. (2004). «Nitrate assimilation in plant shoots depends on photorespiration». *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 101 (31): 11.506-11.510.

[59] MOAT, A. G.; FOSTER, J. W. *Op. cit.*, pp. 263, 265.

[60] Ibídem, p. 267.

entra en los procesos metabólicos de las plantas. Luego, mediante una glutamato sintasa conocida como GOGAT (glutamina 2-oxoglurato aminotransferasa), una de cada dos glutaminas producidas se vuelve a convertir en glutamato para recoger otra molécula de amoniaco. Cada vez que se completa el ciclo GS-GOGAT se gana una glutamina. A partir de la glutamina, el nitrógeno se transfiere por medio de las transaminasas a otras moléculas para formar distintos aminoácidos. El proceso puede ir también en sentido inverso. La asimilación de amoniaco se da tanto en las raíces como en las hojas mediante este método.[61] Finalmente, el nitrógeno asimilado se usa para producir nucleótidos y ácidos nucleicos.

La asimilación es demasiado compleja para que aquí podamos considerarla en detalle. Sin embargo, la importancia de las enzimas en la transferencia de nitrógeno a varias moléculas no puede ser obviada. Nótese que las enzimas asimilatorias de nitrógeno contienen nitrógeno, el mismo elemento cuya asimilación facilitan. Esos procesos están íntimamente ligados a la acción de los genes (cuyos nucleótidos también contienen nitrógeno), los cuales determinan la estructura de las proteínas. Varias de esas mismas enzimas que, de hecho, son el resultado de la codificación de los genes facilitan la acción de los propios genes. Es difícil evitar la necesidad de que todas esas entidades estén presentes simultáneamente para que todo el sistema funcione.

4B. ¿La asimilación es indispensable e ineludible?

Por lo general se ha pensado que las plantas solo absorben nitrógeno en forma de amoniaco o nitratos. Sin embargo, está tomando cuerpo la idea de que las plantas también son capaces de absorber

---

[61] LAM, H-M.; COSCHIGANO, K. T.; OLIVEIRA, I. C.; MELO-OLIVEIRA, R.; CORUZZI, G. M. (1996). «The molecular-genetics of nitrogen assimilation into amino acids in higher plants». *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 47: 569-593.

nitrógeno orgánico parcialmente descompuesto en forma de aminoácidos y, posiblemente, compuestos nitrogenados aún más complejos.[62] Algunas pruebas sugieren que las plantas pueden acceder al nitrógeno orgánico mediante micorrizas. Puesto que la mayor proporción de nitrógeno del suelo es de origen orgánico, la absorción del nitrógeno orgánico no debería sorprender.

¿Se podría eludir la asimilación mediante la absorción de aminoácidos u otras moléculas nitrogenadas? A primera vista, la idea parece plausible y no sorprende que se hayan construido escenarios que la empleen como una manera de eludir el ciclo del nitrógeno al completo. Sin embargo, tras un examen más detallado, limitarse a evitar la asimilación y la fijación del nitrógeno apelando a una atmósfera reductora en la que los aminoácidos, las bases nitrogenadas y otras moléculas nitrogenadas estén libremente disponibles crea sus propios problemas.

Lo primero y más obvio es que no disponemos de pruebas que favorezcan una atmósfera reductora en un pasado distante y que la existencia de esa atmósfera hubiese existido parece increíble. Sin embargo, el objetivo de este artículo no es argumentar contra una atmósfera reductora; tal como ya se ha mencionado, esos argumentos ya han sido formulados en algún otro lugar.[63]

El segundo inconveniente surge de la presuposición de que las moléculas orgánicas nitrogenadas pudiesen atravesar la membrana de las células primitivas. Ello presenta un problema significativo ya que, presumiblemente, se necesitarían dos o más bombas moleculares simples para transportar las moléculas nitrogenadas libremente disponibles. El hecho de que, aun a pesar de que existiera algún tipo de caldo primordial, sería de esperar que la concentración de

---

[62] Un estudio reciente de este tipo que apunta hacia la dirección de la absorción de nitrógeno orgánico es NASHOLM, T.; HUSS-DANELL, K.; HOGBERG, P. (2000). «Uptake of Organic Nitrogen in the Field by tour Agriculturally Important Plant Species». *Ecology* 81: 1.155-1.161. Véase también SPRENT, J. I. *Op. cit.*, p. 19.

[63] Podríamos dar muchas citas. Por ejemplo, véase OHMOTO, H. y WALTON, J. C., cuyas referencias se dan en la nota nº 11.

aminoácidos y otras moléculas nitrogenadas fuese mayor en el interior que en el exterior de las células hace que las bombas fuesen necesarias.

Es probable que la fotosíntesis no proporcionara la energía necesaria para bombear una gran diversidad de moléculas nitrogenadas a través de la membrana de las células primitivas ya que para que ello suceda, se precisan los mismos aminoácidos que se bombean en el proceso. Si se partiese de la idea de que la quimiosíntesis evolucionó antes que la fotosíntesis, la dificultad persiste. No es claro el modo en que una fuente de energía real podría evitar el problema. Además, las proteínas que deberían formar las bombas se componen de aminoácidos. Un escenario de este tipo presenta otros dilemas irresolubles. No conocemos de ninguna membrana orgánica que los aminoácidos puedan cruzar libremente desde áreas en las que las concentraciones son menores hacia otras en las que la concentración sea mayor. Las membranas que carezcan de bombas proteicas que concentren los aminoácidos en un lado son imposibles. Además, la provisión de energía para las bombas está ligada específicamente a algún uso de nucleótidos nitrogenados como el ATP, que sirve de moneda de cambio energética en el metabolismo celular.

La acumulación de amoniaco en el interior de las células presenta un tercer inconveniente. La energía para alimentar cualquier tipo de metabolismo procede del catabolismo de moléculas y, en última instancia, de la fotosíntesis o, de manera menos común, la quimiosíntesis. En los organismos modernos una parte de esa energía se deriva del catabolismo de moléculas nitrogenadas. –Cómo se trata el residuo nitrogenado, será objeto de estudio en la próxima sección.– Si en las células primitivas existiese un sistema de bombeo de aminoácidos a través de la membrana celular, tal sistema necesitaría una fuente de energía. Si los propios aminoácidos fuesen esa fuente energética, entonces se necesitaría un mecanismo que estuviera presente simultáneamente para tratar el amoniaco residual. Ese amoniaco no podría ser consumido como una fuente de amoniaco para la afinación, ya que esas moléculas orgánicas todavía no estarían disponibles por falta de otros itinerarios bioquímicos de-

pendientes de moléculas proteínicas más complejas. En cualquier caso, no tiene mucho sentido que las células fabriquen aminoácidos si ya los tienen a su disposición libremente. Presumiblemente, el amoniaco residual debería ser bombeado o difundido hacia el exterior de las células a través de algún tipo de canal proteico. Ello presupone que un mecanismo de obtención de energía a partir de moléculas orgánicas reducidas podría ser útil como fuente de energía en un entorno reductor tanto a través de la respiración anaeróbica como de la fermentación.

En algunos biomas, por ejemplo en los bosques boreales, el nitrógeno orgánico se recicla rápidamente a través del amoniaco que las plantas absorben directamente. En ausencia de desnitrificación, el material orgánico se acumula y acaba por quemarse en los incendios o sigue formando turba. Tomándolas como un todo, algunas áreas de la biosfera pueden hacerlo sin alterar al balance general del ciclo del nitrógeno, pero, tal como se ha indicado en la discusión de la desnitrificación, a escala mundial un sistema de ese tipo acabaría siendo catastrófico.

En última instancia, otros modos más sencillos de introducir el nitrógeno en las moléculas orgánicas de las células que no sean la asimilación parecen improbables; si bien un entorno reductor los haría necesarios. Puesto que la atmósfera actual es oxidante, y puesto que parece que tal fue el caso en el pasado que podemos determinar,[64] la asimilación es claramente necesaria en las condiciones actuales así como, presumiblemente, en las históricas.

5A. Excreción y descomposición

Las plantas emplean el nitrógeno de manera eficiente y no suelen excretarlo. En los animales la situación es muy distinta. Son incapa-

[64] DUTKIEWICZ, A.; VOLK, H.; GEORGWE, S. C.; RIDLEY, J.; BUICK, R. (2006). «Biomarkers from huronian oil-bearing fluid inclusions: an uncontaminated record of life before the great oxidation event». *Geology* 34: 437-440.

ces de fabricar sus propios aminoácidos y para conseguirlos deben consumir plantas u otros animales que consuman plantas. De esta manera adquieren un exceso de nitrógeno que debe ser excretado. Los distintos animales excretan el excedente de nitrógeno de distintas maneras. Los peces lo hacen en forma de amonio que, aunque es altamente tóxico, se diluye rápidamente en el agua que los rodea. Los mamíferos excretan la urea, que es menos tóxica aunque también necesita grandes cantidades de agua y energía; la producción de urea necesita 4 moléculas de ATP por cada molécula de urea. Las aves y los reptiles excretan ácido úrico en forma sólida, con lo que no se consume agua pero se consume aún más energía. El exceso de pirimidinas y purinas de los ácidos nucleicos también se tratan y se excretan; las pirimidinas como amoniaco o urea, pero las purinas deben convertirse previamente en ácido úrico y, en los mamíferos proseguir con su modificación hasta la obtención de alantoína que, a su vez, es excretada. Puesto que los primates son incapaces de producir alantoína, padecen gota cuando consumen un exceso de purinas.[65] La excreción no solo elimina el exceso de nitrógeno en los animales, sino que también devuelve nitrógeno al ciclo del nitrógeno.

Tanto las plantas como los animales, mueren y dejan restos que necesitan un reciclaje. Incluso estando vivos pierden células de la piel y cabellos. Adicionalmente, cuando los animales comen otros organismos, no consumen o asimilan todas las partes. El exceso, las partes que no han comido y lo que han comido pero no han asimilado y expelen en forma de materia fecal, debe ser reciclado; incluyendo el nitrógeno de desperdicio. A fin de cuentas todas las partes de los animales y las plantas pasan por la descomposición, mediante la cual se rompen en moléculas más simples. Numerosos organismos del suelo facilitan la descomposición: algas y cianobac-

---

[65] MASSEOUD, D.; ROTT, K.; LIU-BRYAN, R.; AGUDELO, C. (2005). «Overview of hyperuricaemia and gout». *Current Pharmaceutical Design* 11: 4.117-4.124. Ver también <http://www.steve.gb.com/science/nitrogen_metabolism.html> [Consulta: 2007].

terias en la superficie, y otras muchas especies en los niveles inmediatamente inferiores (bacterias, hongos, distintos tipos de gusanos, ácaros, muchos insectos e incluso mamíferos excavadores de túneles, por mencionar unos pocos). Al consumirlos, los distintos animales del suelo rompen físicamente los compuestos orgánicos nitrogenados, así como otras moléculas orgánicas. Los desperdicios nitrogenados acaban convirtiéndose de nuevo en amoniaco y por ende en nitritos y los nitratos (mineralización), etcétera, siguiendo con el ciclo del nitrógeno.

Sin embargo, en cualquier momento, más del 90% del nitrógeno contenido en un suelo sano se encuentra en forma de compuestos orgánicos como los aminoácidos. De hecho, un estudio llevado a cabo en Alberta demostró que tan solo del 2 al 5% del nitrógeno del suelo es de origen inorgánico.[66] Los suelos con un alto contenido orgánico tienen niveles de nitrógeno generales más elevados. Un estudio reciente de los sistemas fluviales impolutos demostró que una media del 80% del nitrógeno de esas aguas era orgánico.[67]

La degradación gradual del nitrógeno orgánico mantiene a largo plazo una fuente de nitrógeno rápidamente disponible y fácil de controlar que acabaría por perderse en la mineralización con la consiguiente pérdida por drenaje si la rotura ocurriese a una tasa demasiado elevada, como sería el caso en la mayoría de las regiones tropicales. Las plantas de las regiones húmedas tropicales absorben rápidamente los nutrientes disponibles, de manera que esos nutrientes se integren en tejidos vivos. La destrucción masiva de las selvas

---

[66] *AESA Soil Quality Benchmark Sites*. «Alberta Environmentally Sustainable Agriculture (AESA). Alberta Agriculture, Food and Rural Development». También disponible en Internet: <http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/aesa1861?opendocument> [Consulta: 2007].

[67] PERAKIS, S. S.; HEDIN, L.O. (2002). «Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds». *Nature* 415: 416-419. Véase también: <http://www.nature.com/news/2002/020121/pf/020121-10_pf.html> [Consulta: 2007].

tropicales deja muy pocas plantas que puedan asimilar los nutrientes del suelo y se sigue una destrucción muy rápida de las moléculas orgánicas. Los nutrientes minerales –incluidos los nitratos y el amoniaco– se drenan rápidamente y dejan tras de sí un suelo duro, insoluble y estéril.

En última instancia, los productos de desecho nitrogenados se reciclan en su totalidad, tanto de regreso hacia la atmósfera como de vuelta hacia los organismos a través del amoniaco y los nitratos, en cuyo caso los nitratos tienen la función de encrucijada principal del ciclo del nitrógeno. Cuando se alteran las condiciones naturales, ya sea sobrecargando los sistemas naturales como, por ejemplo con el uso de fertilizantes nitrogenados, o acelerando la mineralización con la destrucción de las selvas tropicales, el resultado es inevitablemente negativo. Para que el ecosistema presente una buena salud, es preciso que se halle presente un grupo mínimo de organismos capaces de desempeñar cada paso del ciclo del nitrógeno. Aun cuando ello sea así, la restauración de un ecosistema dañado puede ser difícil, como sucedería con el suelo estéril que queda después de la degradación de las selvas húmedas. Poner en primer lugar el ciclo del nitrógeno sería una proeza notable con independencia de cómo se llegue a ello.

5B. ¿La excreción y la descomposición son indispensables e ineludibles?

Los animales necesitan un mecanismo que trate los desperdicios nitrogenados. Que ello es cierto se apoya en que se ha observado que ningún animal carece de un sistema que maneje ese tipo de desechos. Esos sistemas consumen mucha energía y cuando fallan los animales mueren. ¿Sería posible la evolución de un sistema de manera en el que los desechos nitrogenados no se reciclaran? La respuesta es que no; la lógica lo impide. No es razonable que los desechos nitrogenados se acumulen de forma constante sin que ello se traduzca en una merma de los organismos vivos que contienen nitrógeno hasta el punto de su total extinción. Esto sería cierto

en un mundo compuesto por bacterias simples, un mundo de ARN, en un ambiente oxidante o reductor. Aun cuando no hubiera producción de desechos alguna, fueran cuales fueran la vida o los precursores de la vida, no se podrían acumular continuamente sin agotar todas las fuentes y crear un estancamiento.

En un esquema darwinista, la muerte es necesaria para eliminar los individuos menos adaptados y los componentes de los individuos muertos deben reciclarse para el uso de aquellos que sobreviven y generan más descendencia. Los organismos muertos o inadaptados no pueden acumularse sin cesar; caso contrario, la evolución darwinista quedaría detenida. El necesario reciclado del nitrógeno de origen orgánico se consigue con la excreción y la descomposición. Así pues, la excreción y la descomposición son necesarias pero, ¿son eludibles?

Nótese que existe una diferencia entre ser eludible en el momento en que surgiera la vida y en el presente, en que es posible que existan muchos sistemas orgánicos redundantes capaces de llevar a cabo las mismas tareas u otras relacionadas. Por ejemplo, en teoría debería ser posible conseguir que las rutas bioquímicas fuesen reversibles, es decir, que el proceso se diera tanto en un sentido como en otro. Por tanto, según esta hipótesis, una ruta anabólica se podría adaptar como una ruta catabólica si ello fuese necesario, y viceversa. Aunque haya razones que impiden que esto ocurra, en ausencia de otras opiniones, esto sería todo cuanto fuera alcanzable. Si tal fuera el caso, en un organismo que ya dispusiera de la capacidad de construir algunos tipos de polímeros. También sería capaz de usar la misma ruta bioquímica para degradarlos. Que la ruta funcionase de manera anabólica o catabólica dependería de las circunstancias en que existiera. Ese mismo organismo podría construir polímeros en unas condiciones determinadas y consumirlos en otras. Con el tiempo, distintas poblaciones en distintos ambientes podrían ser capaces de adaptar su metabolismo a las distintas tareas a las que destinaron sus sistemas bioquímicos.

Con esta hipótesis surge el problema de que presupone la existencia previa de una ruta anabólica. Es imposible que se iniciara con una ruta catabólica ya que, si los polímeros susceptibles de degra-

dación no fuesen abundantes, ¿habría tiempo suficiente para que se adaptara a la tarea catabólica –o para la evolución de un sistema catabólico separado– antes de que los metabolitos sintetizados colapsasen la ruta, llevándola a su progresiva detención? Parece improbable obtener una respuesta precisa a esta pregunta, pero no es preciso, ya que para llegar a este punto lo primero que se necesita es un milagro, una ruta anabólica adaptable a catabólica en pequeños pasos, todos ellos adaptativos. Aun así, de todos los distintos pasos del ciclo del nitrógeno, este sería el más susceptible de eludir de algún modo, tanto adaptando una ruta bioquímica como confiando, sencillamente, en que algún incendio ocasional devolviese el nitrógeno a la atmósfera o el suelo en forma de óxidos de nitrógeno.

El proceso de excreción no se elude tan fácilmente y necesita mecanismos para destoxificar los productos de desecho nitrogenados y su eliminación de la célula o el cuerpo. Sea cual sea el producto de desecho, no es asunto banal. Incluso en los animales que excretan amoniaco directamente son necesarios unos canales proteicos específicos o bombas y, por ello, no es un paso eludible fácilmente.

DISCUSIÓN

Una gran parte de la argumentación de este artículo depende de las altas tasas de reacción resultantes de la acción de enzimas biológicas y de la manera en que los sistemas biológicos dirigen las reacciones en una dirección específica. En teoría, todos y cada uno de los componentes del conjunto de reacciones químicas al que damos el nombre de ciclo del nitrógeno, se dan sin intervención biológica alguna. Pero, ¿esas reacciones abióticas se dan en una tasa suficiente para mantener un ciclo esencial para la vida como es el ciclo del nitrógeno? ¿Son reacciones que alternan la dirección de manera que trabajen sin acumular productos intermedios en puntos específicos del ciclo? Con la posible excepción de la fotólisis del amoniaco, un componente secundario del ciclo, no parece que sea el caso. Es obvio que, de haber existido un ciclo del nitrógeno abiótico, la

vida habría sido sostenible; no habría necesidad real alguna de un ciclo biológico del nitrógeno, como tampoco hay necesidad de un ciclo biológico del agua.

No se ha emprendido la crítica detallada de las teorías darwinistas actuales sobre la evolución del ciclo del nitrógeno. Una búsqueda detallada en la bibliografía muestra muchos artículos que hablan de la evolución del ciclo del nitrógeno, pero su examen no ha revelado ningún modelo definido. En lugar de discutir el modo en que el ciclo pudo evolucionar por medio de algún mecanismo darwinista, esos artículos suelen discutir únicamente la evolución y la genética de etapas específicas del ciclo del nitrógeno[68] o presentan aquello que se cree que fue necesario partiendo de a presuposición de algún tipo de mecanismo darwinista.[69] Se han propuesto algunos ciclos inorgánicos del nitrógeno pero la transición al ciclo orgánico conocido en la actualidad no queda clara, así como si alguna vez se dieron las condiciones específicas en que se cree que esos ciclos serían posibles. En esencia, el ciclo biológico del nitrógeno presenta el mismo tipo de dilema que enfrentó Leslie Orgel en su observación sobre el ciclo del ácido cítrico:

> «Soy de la opinión que la química conocida no proporciona ninguna base para creer que, de manera espontánea, puedan llegar a organizarse largas secuencias de reacciones, como tampoco ninguna razón para lo contrario. El problema de conseguir una especificidad suficiente, tanto en una solución acuosa como en la superficie de un mineral, es tan grave que la probabilidad de cerrar un ciclo de reacciones tan complejo como el ciclo inverso del ácido cítrico, por ejemplo, es muy remota».[70]

---

[68] POSTGATE, J. *Op. cit.* pp. 77-99.

[69] *a*) SPRENT, J. I. *Op. cit.*, pp. 29-48. *b*) POSTGATE, J. R.; LADY, R. R. (1988). «The evolution of biological nitrogen fixation». En: BOTHE, H.; DE BRUIJN, F. J.; NEWTON, W.E. (eds.). *Nitrogen Fixation: Hundred Years After*. Stuttgart: Gustave Fischer, pp. 31-40

[70] ORGEL, L. (1998). «The origin of life a review of facts and speculations». *Trends in Biochemical Sciences* 23: 491-495.

Si el argumento general establecido en este artículo –que todos y cada uno de los pasos del ciclo del nitrógeno deben aparecer de manera necesaria en un período limitado de tiempo y no son producto de un proceso darwinista– es cierto, en ausencia de alguna causa inteligente las posibilidades evolucionistas más razonables serían dos. La primera es que el ciclo al completo evolucionó en un único organismo y, posteriormente, ese organismo fue el origen de toda una serie de grupos de organismos que hoy participan en distintas etapas del ciclo del nitrógeno. Con el tiempo, algunos grupos de esta población ancestral debieron perder varios componentes y se especializaron en otros. Esta posibilidad parece increíble atendiendo a las profundas diferencias que presentan los organismos implicados. La transferencia lateral genética podría ser una explicación a una parte de este problema, pero en cualquier caso se necesita una evolución de todo el ciclo en un organismo en un pasado muy remoto de la historia de la vida. Dada la complejidad del ciclo del nitrógeno, esta hipótesis pone a prueba la credulidad.

Una segunda posibilidad sería que distintos componentes del ciclo del nitrógeno evolucionaran en distintos taxones que evolucionasen al mismo tiempo o, como mínimo, antes de que la acumulación de los productos de un paso determinado alcanzase los niveles de toxicidad. Ello significaría que, sin ningún objetivo en mente, los mecanismos darwinianos produjeron todo cuanto fuese necesario para que el ciclo funcionase, a la vez que se conseguía una coordinación suficiente entre los distintos pasos del ciclo del nitrógeno que evitase la insoslayable presencia de problemas que lógicamente se siguen del hecho de que al menos algunos pasos estén ausentes o fuera de equilibrio con los otros. Una vez más esta posibilidad parece increíble dado lo reducido de la ventana temporal de que se disponía, la cuestionable presión selectiva para que se dieran todos los pasos y la necesidad de que un ciclo completo pudiera sostener la producción de proteínas en una atmósfera cualquiera que no fuera reductora, de cuya existencia no existen pruebas.

En esencia, esta segunda hipótesis es parecida a las explicaciones que recurren al cambio funcional en la producción de máquinas celulares irreduciblemente complejas y comparte su debilidad espe-

culativa. La diferencia estriba en que un sistema ecológico como el ciclo del nitrógeno necesitaría que varios organismos, todos ellos con una evolución independiente, consiguiesen de manera fortuita la producción necesaria para su existencia en lugar de diversos componentes combinados casualmente en un único organismo.

Sugerir que únicamente los organismos, sin una guía inteligente imposible de producirse mediante la selección natural, pudiese llegar a construir un ciclo ecoquímico coordinado como el ciclo del nitrógeno adolece de optimismo. Atendiendo a la cantidad de posibles compuestos de nitrógeno reactivos, se requeriría mucha buena suerte para que el azar impidiera la evolución de rutas bioquímicas que obstaculizasen la vida. Por ejemplo, por qué la evolución no dio organismos productores de cianuro (CN^-) como producto de desecho no es obvia. Por tanto, hay importantes restricciones al modo en que surgió el ciclo del nitrógeno. También merece la pena mencionar que en ambas hipótesis, la evolución en un único organismo o la evolución en múltiples organismos, se debe superar el problema de que la evolución del ciclo biológico del nitrógeno solo se pudo dar en organismos dependientes de las proteínas.

Behe esbozó las razones por las que los poderosos argumentos en favor del diseño en la naturaleza se pueden basar en la bioquímica. Es posible resumirlas como sigue:

1. La bioquímica permite la observación del «fundamento de la vida».[71]
2. La comprensión que se tiene de la química y la física es suficiente para poder evaluar las afirmaciones al respecto del comportamiento de los átomos.
3. Existen diferencias significativas entre lo que afirma el darwinismo que hicieron los átomos y lo que los átomos hacen en realidad

En pocas palabras, se sabe que los átomos se ordenan según ciertas relaciones que llamamos leyes físicas. No se sabe de ninguna de esas leyes o sus combinaciones que produzca máquinas co-

[71] BEHE, M. J. *Op . cit.* p. 33.

mo las máquinas proteicas de las células vivas o la información depositada en la disposición ordenada de moléculas del ADN.

En este artículo nos preguntamos si las características del diseño que Behe reconoce en las rutas bioquímicas y las máquinas moleculares en el interior de organismos individuales, pueden ser evidentes en las rutas "ecoquímicas" en las cuales los organismos interactúan según complejos patrones de interdependencia. El centro de atención principal ha abordado la cuestión de si es posible construir una argumentación rigurosa para el ciclo del nitrógeno, equivalente a la complejidad irreducible tal como la define Behe.

De ser evidente al nivel ecológico, tal sistema sería similar a la complejidad irreducible pero también presentaría importantes diferencias con respecto a la complejidad irreducible bioquímica. Por ejemplo, en lugar de macromoléculas que interactúan en el interior de los organismos, esos sistemas involucran organismos completos y, potencialmente, comunidades enteras de organismos que interactúan unos con otros así como con los constituyentes inorgánicos del nicho que ocupan. Para describir este tipo de sistemas ecológicos proponemos el término 'interdependencia irreducible' (II). Para que un sistema presente II debe responder a las siguientes características, paralelas a las que Behe esboza para los sistemas CI:

1. El sistema no debe presentar alternativas de funcionamiento inorgánicas obvias y plausibles. En otras palabras, los potenciales huecos del sistema no pueden ser eludidos ni evitados únicamente por la acción de la naturaleza.
2. Debe presentar un grado de especificidad que indique que no hay un número de soluciones al problema que haga probable la intervención del azar.
3. Es posible encontrar una función o paso determinado del sistema en distintos organismos no relacionados entre sí. En el caso específico de los itinerarios ecoquímicos, aquello que es irreducible no es un organismo específico, sino la capacidad de llevar a cabo una reacción bioquímica necesaria para el itinerario ecoquímico. En algún lugar de la naturaleza, las enzimas necesarias para catalizar las reacciones deben existir en cantidades suficientes y ser distribuidas de manera ade-

cuada para mantener la función del sistema, tanto si se da en una única especie como en varias. Las especies no son necesariamente desechables ya que pueden llegar a ser indispensables para el avance del proceso en aquellas condiciones en las que otras especies ven reducidas sus capacidades o no están presentes. En última instancia, no cuentan las especies *per se* sino la función enzimática; las especies "redundantes" constituyen una reserva vital contra la alteración del sistema.

4. Al tiempo que se deja intacto el resto del ciclo, la eliminación de uno o varios pasos biológicos individuales, aunque no necesariamente todos, debe tener como resultado la pérdida de la función de todo el sistema. Nótese que esto no quiere decir que todos y cada uno de los pasos deben ser esenciales para el sistema, sino que lo son algunos. Además, los pasos que sean eliminados deben ser demasiado complejos para ser el resultado de una o varias mutaciones aleatorias y afortunadas. Cuantos más pasos o componentes se necesitan para que el sistema funcione, tanto más fuerte será el argumento de que no hay un camino directo para construir paso a paso el sistema mediante una serie de mutaciones relativamente pequeñas y oportunas. Ello no significa que sea imposible construir el sistema mediante un proceso tortuoso ya que la eliminación de un número esencialmente infinito de complejos caminos indirectos sería improbable.[72]
5. En un sistema II, los pasos individuales pueden ser adaptaciones de las especies individuales que los ejecutan y la selección natural puede ser capaz de actuar sobre los individuos. La selección natural no suele concebirse como un proceso que opere a escala global para construir un ciclo como el ciclo del nitrógeno de manera teleológica. Puesto

[72] Tal como indica Behe (Ibíd., p. 61): «No obstante, al aumentar la complejidad de un sistema interactuante la posibilidad de ese camino indirecto decae drásticamente».

que los pasos individuales de un sistema II pueden ser adaptaciones de especies individuales que los desarrollan (aun cuando los propios pasos puedan ser CI) ello constituye una diferencia sustancial entre un sistema II y otro CI.

En el entorno, los sistemas II actúan de manera similar a los sistemas bioquímicos de los organismos, pero difieren de ellos en el hecho de que el resultado típico de las alteraciones de los sistemas bioquímicos es una reducción de la adaptación o la muerte de los individuos, mientras que la interrupción de un sistema II puede dar como resultado un colapso de los ecosistemas local o incluso a escala planetaria. A causa de que los pasos individuales de los sistemas II pueden estar esparcidos entre múltiples organismos, como es el caso de la fijación del nitrógeno, la modificación de los sistemas II, en particular a una escala planetaria, puede ser más difícil que los sistemas CI relativamente simples encontrados en los organismos individuales. La redundancia natural establecida en los sistemas II, así como su distribución en el tiempo y en el espacio, pueden hacer que su estudio empírico sea un desafío mayor que los sistemas bioquímicos de los organismos individuales.

Otra diferencia entre un sistema bioquímico y otro ecoquímico estriba en que el almacenamiento de metabolitos específicos puede ser más amplia en un sistema ecoquímico de lo que es posible en las células individuales y los organismos. Por ejemplo, como se ha mencionado más arriba, el amoniaco es altamente soluble en agua, por lo que los océanos son una gran reserva de amoniaco. Ello permitiría que la vida existiese durante algún tiempo en ausencia de que devuelvan el amoniaco a los organismos o a la atmósfera como sucede con los pasos de nitrificación y desnitrificación que restituyen el amoniaco a la forma de nitrógeno. En última instancia surge la cuestión, ¿hay suficiente tiempo para que la naturaleza, sin guía alguna, sea capaz de producir una solución a los problemas causados por la progresiva acumulación de los productos de las reacciones antes de que la vida se vuelva imposible? Dadas las tasas de reacción ampliamente mayores que generan las enzimas, el tiempo del que se dispone debe ser relativamente corto, al menos para los estándares geológicos convencionales. Además, ninguna cantidad

de tiempo provoca que las reacciones hagan algo distinto a buscar el equilibrio, ya sea de manera rápida o más lentamente. Parece que la capacidad de impulsar las reacciones en una dirección específica es el campo de trabajo de los químicos especializados en complejos laboratorios e itinerarios bioquímicos/ecoquímicos de los seres vivos.

Tanto si son II como si no, las íntimas interdependencias de los sistemas ecoquimicos merecen ser destacadas. Los mecanismos de fijación del carbono, en especial la fotosíntesis, dependen estrechamente de la fijación del nitrógeno que, a su vez, depende de ellos. La figura 2 representa esta distinta clase de dependencia a mayor escala. Al menos tal como se entiende actualmente, la fotosíntesis y la fijación del nitrógeno son vitales para la vida. Aunque sea posible aislar el ciclo N y estudiarlo de manera independiente, no podemos ignorar su relación con otros procesos biológicos y geológicos si deseamos apreciar cómo funciona el ciclo en la naturaleza. Al fin y al cabo, este ciclo ecoquímico tiene su propia ecología.

El ciclo del nitrógeno cumple los criterios establecidos para un sistema II. Sin embargo, es preciso que seamos prudentes a la hora de sacar conclusiones en firme a partir de este itinerario ecoquímico. Una gran parte de la argumentación de este artículo depende de inferencias lógicas, pero no todas han sido comprobadas y la comprobación, si es posible, debería ser previa a las grandes afirmaciones.

Por ejemplo, si bien es obvio que los pasos del ciclo, como la desnitrificación, pueden ser desbordados con el uso de fertilizantes químicos, no por ello tiene que ser obvio que esto sucediera en ausencia de bacterias desnitrificadoras. Parece razonable pensar que se produzca la eutrofización, pero no se ha comprobado. Por tanto, parece que es necesario desarrollar sistemas modelo. En este caso específico, quizá las comunidades de bacterias autocontenidas, sin bacterias desnitrificadoras, podrían ser puestas a prueba para ver qué resultados reales dan. Ello contribuiría a determinar si la eliminación de las bacterias desnitrificadoras provoca realmente un au-

mento de los nitratos seguido de un crecimiento súbito y, finalmente, la muerte del sistema.

A pesar de la atractiva y aparente sencillez de una ruta ecoquímica como el ciclo del nitrógeno, al estar distribuido entre distintos organismos en un entorno natural nunca es tan sencillo como una única ruta en un único organismo. Con esta advertencia en mente, que debería instigar más investigación de laboratorio, el ciclo del nitrógeno tiene la apariencia de ser un sistema II en potencia. Ello tiene profundas implicaciones en el establecimiento del tiempo de aparición de los organismos. A diferencia de otros sistemas, que puedan aparecer en organismos individuales como resultado de causas inteligentes, si se acaba por demostrar que el ciclo del nitrógeno u otros sistemas ecológicos son II, sería preciso que una Inteligencia actuara aún con más implicación, ya que los organismos, que compongan dicho ciclo, deberían obtener los componentes del sistema al que contribuyen dentro de las limitaciones temporales que imponen las fuentes inorgánicas y los depósitos para aportar los sustratos y absorber los productos de manera que la vida siguiera siendo posible. En otras palabras, el sistema completo se entiende de manera razonable como habiendo surgido durante a lo largo de un corto intervalo de tiempo. Si existen, los sistemas II cierran el paso al mecanismo neodarwinista y se explican mejor como producto de un plan y un propósito producto de una Inteligencia.

COMENTARIOS BIBLIOGRÁFICOS

ECOLOGÍA: LA DIVERSIDAD OCEÁNICA INCREMENTA LA PRODUCTIVIDAD

WORD, B.; BARBIER, E. B.; BEAUMONT, N.; DUFFY, J. E.; FOLKE, C.; HALPERN, B. S.; JACKSON, J. B. C.; LOTZE, H. K.; MICHELIK, F.; PALUMBI, S. R.; SALA, E.; SELKOE, K. A.; STACHOWITCZ, J. J.; WATSON, R. (2006). «Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services». *Science* 314: 787-790.

Resumen. Los océanos brindan servicios útiles a los seres humanos, entre ellos se encuentra la pesca y otras fuentes de alimentos y la mejora de la pureza del agua gracias a sus actividades de filtrado y detoxificación. La pérdida de diversidad trae consigo una reducción de la calidad de esos servicios. Según un estudio realizado sobre el cierre de cuatro áreas de pesca y 44 reservas marinas, en las áreas en que la diversidad se ha visto fuertemente amenazada, el establecimiento de reservas y el cierre de piscifactorías han incrementado la biodiversidad una media del 23%, según un estudio de cuatro piscifactorías cerradas y de 44 reservas marinas. La conservación de la biodiversidad es necesaria para que los océanos puedan continuar sirviendo a la humanidad como lo hicieron en el pasado.

Comentario. La conservación medioambiental no solo implica la protección de algunas especies por motivos sentimentales. La productividad biológica colabora en el sustentamiento de las necesidades humanas y su productividad se ve afectada negativamente con las reducciones de la biodiversidad. La mayordomía cristiana incluye la obligación de que nuestras interacciones con el medioambiente, incluidas las otras especies, esté guiada por principios responsables e informados.

GENÉTICA: PSEUDOGENES

MIRA, A.; PUSHKER, R. (2005). «The silencing of pseudogenes». *Molecular Biology* 22: 2135-2138.

Resumen. Los pseudogenes se dividen en distintas clases. Este artículo trata sobre aquellos que en un tiempo fueron genes bacterianos funcionales y que ahora carecen de función debido a las mutaciones. Aunque esos pseudogenes específicos ahora carezcan de función en una cepa de una especie bacteriana, en otras tienen su función. Los autores se concentraron en las secuencias esenciales para la transcripción y la traducción de los genes y descubrieron pruebas de la selección de secuencias para el control de mutaciones de pseudogenes que impide su expresión como proteínas truncadas. Estas pruebas son especialmente fuertes en la secuencia Shine-Dalgarno, una secuencia de nucleótidos del ARNm que indica la unión al ribosoma y, por lo tanto, la traducción de la secuencia que la sigue.

Comentario. Se han presentado los pseudogenes como la prueba de un ancestro común. Por ejemplo, el gen de la L-gulono-gamma-lactona oxidasa (GLO), esencial para la producción de vitamina C es un pseudogén en los seres humanos, los primates y, de manera extraña, en los cerdos de Guinea, pero no en otros vertebrados. Los darwinistas lo interpretan como una sinapomorfia que conecta los seres humanos y los simios con un ancestro común que tenía un gen GLO mutado. Sin embargo, están surgiendo pruebas que indican una funcionalidad que puede ser seleccionada en algunos pseudogenes[1] y que al menos algunas mutaciones similares pueden ser el resultado de algún tipo de mecanismo y no del simple azar.

[1] WOODMORAPPE, J. (2003). «Pseudogene function: more evidence». *Technical Journal* 17: 15-18.

En este artículo, la teoría según la cual las mutaciones específicas pueden tener algún tipo de "objetivo" o que las mutaciones específicas pueden ser seleccionadas está bien argumentada. Se recomienda prudencia al comparar los pseudogenes bacterianos con los pseudogenes eucariotas, aunque es claro que algunas porciones de los pseudogenes bacterianos no reflejan únicamente la acción de mutaciones aleatorias. Si es a causa de una selección positiva –como se sugiere en el artículo comentado– o de algún otro tipo de mecanismo queda pendiente de determinar, pero una cosa es cierta, las bacterias poseen elaborados mecanismos que mitigan el impacto de los genes dañados. Esos mecanismos incluyen un sistema de etiquetado para eliminar los productos genéticos truncados de los pseudogenes, caso de que se produzcan.[2] No carece de sentido esperar que las células eucariotas presenten mecanismos de una elegancia semejante y que, por tanto, algunas mutaciones interpretadas como producto de un ancestro común se puedan explicar mejor como el producto de mecanismos diseñados para minimizar el impacto de los genes rotos (TGS).

GEOLOGÍA: TENDENCIAS EN LA SEDIMENTACIÓN

PETERS, S. E. (2006). «Macrostratigraphy of North America». *Journal of Geology* 114: 391-412.

Resumen. Las lagunas en la deposición marcan los límites entre los conjuntos rocosos que tienen un historial de sedimentación continua. Los puntos de inicio y fin de esos paquetes rocosos limitados por lagunas están claramente definidos por una litología específica,

[2] WITHNEY, J. H.; FRIEDMAN, D. I. (2003). «A salvage pathway for protein structures: tmRNA and trans-translation». *Annual Review of Microbiology* 57: 101-123.

un contenido fósil, etcétera. Se identificó un total de 4.173 paquetes de ese tipo a partir de los mapas confeccionados por la American Association of Petroleum Geologists. El análisis de esos paquetes rocosos puede dar información útil para reconstruir la historia deposicional de Norteamérica. El estudio reveló varias tendencias interesantes. El número de paquetes rocosos es mayor en el Neógeno y menor en el límite Permo-Triásico. Se dan otros picos en el Cámbrico Superior, el Ordovícico Medio, el Devónico Superior, el Carbonífero Superior y el Cretácico Medio. Otro patrón interesante es el cambio desde los carbonatos dominantes en el Paleozoico hacia sedimentos más terrestres en el Cenozoico. Las evaporitas están confinadas en un intervalo que va desde el Silúrico al Cretácico, con un pico en el Pérmico. En el Cenozoico se observa un espectacular incremento de los sedimentos terrestres. Entre el Paleozoico y el Mesozoico se da una importante discontinuidad en la deposición. Las cuencas paleozoicas se debilitan lentamente, mientras que las mesozoicas lo hacen a un ritmo más acelerado. Las rocas volcánicas del Paleozoico son, en su mayoría, submarinas, a la vez que las del Cenozoico son más terrestres.

Comentario. Compilaciones de este tipo pueden ser de utilidad en los esfuerzos por reconstruir la historia de la Tierra en un marco temporal más reducido del que se considera normalmente. Es probable que las compilaciones basadas en los continentes sean más útiles que las compilaciones a nivel planetario porque estas últimas no distinguen entre las historias potencialmente distintas de los continentes. Es típico de los modelos conceptuales del Diluvio bíblico que presupongan que el agua alcanzó a cubrir todo el planeta y una posterior regresión, también a escala planetaria. Una inundación planetaria sería la causa principal de la sedimentación marina, incluidos los carbonatos, mientras que una regresión a esa misma escala causaría grandes cantidades de depósitos terrestres que se acumularían en las cuencas interiores. Ello encaja con los modelos generales indicados aquí.

PALEOBIOGEOGRAFÍA: AVES EUROPEAS

MAYR, G. (2005). «The Paleogene fossil record of birds in Europe». *Biological Reviews* 80: 515-542.

Resumen. En este artículo se resume el registro fósil de las aves del Paleógeno en Europa. Aunque las aves arborícolas incluyen algo más de la mitad de las especies, no se encuentran en los sedimentos europeos del Oligoceno. Todas las aves preoligocénicas se encuentran en distintas ramas evolutivas distintas a las ocupadas por los miembros de las familias de aves modernas. Algunas aves fósiles europeas del Paleógeno actualmente se encuentran recluidas, o casi, en Centro y Sudamérica. En ellas se incluyen los posibles ancestros de las chuñas; los urutaúes; los colibríes; los momotos, barranqueros o guardabarrancos; y los buitres del Nuevo Mundo. Otras anomalías biogeográficas incluyen los podargos y, posiblemente, los gansos urraca o gansos overos, que ahora solo se encuentran en la región de Australia, y los pájaros ratón, restringidos actualmente a África. Varios grupos modernos, incluidos los somormujos, los halcones, las palomas y los cucos no se encuentran en el Paleógeno europeo.

Comentario. La teoría creacionista incluye la proposición de que, tras el Diluvio, todos los vertebrados terrestres se dispersaron desde el sudeste asiático. La restricción de varias familias de vertebrados terrestres a regiones distantes como Australia o Sudamérica es un problema biogeográfico sobre el cual se ha discutido mucho pero que sigue sin resolverse. La identificación de varias familias de aves cuya presencia se restringe a Australia o Sudamérica puede indicar que el registro fósil de las aves no está suficientemente completo como para permitirnos trazar la historia de la dispersión de los vertebrados terrestres tras el Diluvio.

PALEONTOLOGÍA: PLENITUD DEL REGISTRO FÓSIL DE LOS BIVALVOS

VALENTINE, J. W.; JABLONSKI, D.; KIDWELL, S.; ROY, K. (2006). «Assessing the fidelity of the fossil record by using marine bivalves» *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 103: 6599-6604.

Resumen. Muchos estudios de las tendencias del registro fósil dependen de que el propio registro fósil esté completo. No es posible medir si el registro fósil está completo, cuando se desconoce el número total de taxones del área de procedencia. En el caso de los bivalvos vivos, conocemos de manera razonable el número de géneros vivos e incluye 1.292 géneros y subgéneros. De ellos, 308, lo que equivale a un 24%, se conocen como fósiles. La mayoría de los géneros desaparecidos tienen una o más de las siguientes características: talla reducida (menos de 1 cm de longitud), caparazón de aragonito (en oposición a la calcita), restringidos a grandes profundidades (más de 200 m) o viven dentro del substrato en lugar de sobre él. Los estudios de los bivalvos fósiles deberían tener presente la naturaleza de los taxones objeto de estudio para valorar los efectos potenciales de los taxones ausentes.

Comentario. Un registro fósil completo tiene implicaciones significativas para las teorías del ancestro común. Las estimaciones de si está completo, basadas en la proporción de los taxones vivos conocidos como fósiles parecen superiores a otros métodos empleados para estimar si está completo. Si el registro fósil de los bivalvos se encuentra en un 76% a un nivel genérico, sería de esperar que se pudiera encontrar aproximadamente un 76% de los pasos evolutivos en el nivel del género de los pretendidos linajes de bivalvos. Se podrían hacer declaraciones similares al respecto de otros taxones con un buen registro fósil.

PALEONTOLOGÍA: HUELLAS DE DINOSAURIO Y POSIBLE POLIFILIA DE LOS DINOSAURIOS

THULBORN, T. (2006). «On the traces of the earliest dinosaurs: implications for the hypothesis of dinosaurian monophyly». *Alcheringa* 30 (2): 273-311.

Resumen. La creencia de que los dinosaurios son monofiléticos está ampliamente difundida. Se han propuesto varias sinapomorfias como prueba de dicha monofilia, pero según estudios recientes casi todas ellas son dudosas o equívocas. La mejor sinapomorfia propuesta, cuando no la única, que queda sin desbancar es el acetábulo completamente perforado. Las pruebas de las huellas de dinosaurios y la estructura de sus patas se explican más fácilmente si se proponen ancestros separados para cada uno de los tres clados: terápodos, saurópodos y ornitisquios. Cada uno de esos clados tiene una disposición ósea de la pata que no es fácilmente derivable de un único ancestro común, sino que su explicación resulta más sencilla si hubiese evolucionado de manera independiente de tres ancestros separados. De ser así, los dinosaurios serían polifiléticos y se requeriría que el término 'dinosaurio' se expandiera para incluir algunos fósiles de arcosaurio que actualmente se clasifican como tecodontes.

Comentario. El término 'dinosaurio' se ha hecho tan familiar que sería preciso hacer algún reajuste para substituirlo por tres nombres separados o incluir algunos fósiles que son obviamente distintos de todo cuanto hoy llamamos dinosaurio. Aun así, a priori no hay ninguna razón para presuponer que los dinosaurios deben derivar de un único ancestro común y dividirlos en tres grupos estimularía el estudio adicional para determinar si cada uno de los tres grupos es realmente un grupo natural o si es preciso que se representen ancestros separados. Los dinosaurios aparecen en el registro fósil completamente formados, sin ancestros conocidos y no hay ninguna

prueba física real de su monofilia o de que constituyan tres linajes separados.

PALEONTOLOGÍA: ESTASIS MORFOLÓGICA EN LAS LAMPREAS

GESS, R. W.; COATES, M. I.; FUBIDGE, M. S. (2007). «A lamprey from the Devonian period of South Africa». *Nature* 443: 981-984.

Resumen. La lamprea fósil geológicamente más antigua que se conoce se halló en unos sedimentos devónicos de Sudáfrica. Comparte muchas similitudes con las especies de lamprea vivas en la actualidad, más incluso que otras de lamprea paleozoicas. Aunque el registro fósil incluye una diversidad morfológica mayor que la observada entre los miembros vivos del grupo, la existencia de las lampreas como especie viva se remonta hasta su aparición en el registro fósil. Las lampreas merecen el nombre de "fósiles vivientes".
Comentario. Parece que las lampreas fósiles eran más diversas morfológicamente que las lampreas vivas, cuyas especies representan un remanente de esa antigua diversidad. Las lampreas vivas representan otro ejemplo de estasis morfológica y podrían sugerir que las lampreas tienen un ancestro separado de otros grupos.

PALEONTOLOGÍA: ESTASIS EN LOS MICROBIOS

SCHMIDT, A. R.; RAGAZZI, E.; COPPELLOTTI, O.; ROGHI, G. (2006). «A microworld in Triassic amber». *Nature* 444: 835.

Resumen. El ámbar triásico encontrado en Italia contiene bacterias fósiles, hongos, algas y protozoos. Algunos de esos fósiles de ám-

bar se pueden identificar como géneros aún vivos. En ellos se incluyen los désmidos, parecidos al género vivo *Cosmarium*, protozoos ciliados del género *Coleps* y amebas testadas idénticas a *Centropyxis hirsuta*. Se cree que el ámbar procede de coníferas de la familia extinta de las cheirolepidiáceas.

Comentario. A causa de su estructura simple y su corta vida, cabría esperar que los microorganismos estuviesen sujetos a cambios morfológicos relativamente rápidos tras largos períodos de tiempo. La persistencia de géneros e incluso quizás especies desde el Triásico Superior parece destacable y sugiere que desde el Triásico Superior ha transcurrido mucho menos tiempo del que se supone, que los protozoos pueden ser más resistentes de lo que se cree a los cambios morfológicos o ambas cosas a la vez.

ESPECIACIÓN: GENES QUE CAUSAN ESTERILIDAD EN LOS HÍBRIDOS DE DROSÓFILA

BRIDEAU, H. J.; FLORES, H. A.: JUN WANT; MAHESWARI, S.; XU WANG; BARBASH, D. A. (2006). «Two Dobzhansky-Muller genes interact to cause hybrid lethality in *Drosophila*». *Science* 314: 1292-1295.

Resumen. De modo independiente, Dobzhansky y Muller propusieron que la esterilidad híbrida se daría cuando las especies experimentasen distintas mutaciones en los genes que interactúan funcionalmente. Ello causaría la esterilidad del híbrido debido a que los productos de ambos genes interactúan de manera inadecuada. Así parece haber ocurrido en dos especies de drosófila. El gen *Lethal hybrid rescue* (Lhr) produce una proteína que interactúa con la proteína producida por el gen *Hybrid male rescue* (Hmr). En *D. similans* se han producido mutaciones del primer gen, mientras que en *D.*

melanogaster las mutaciones se dieron en el segundo. El resultado es que los híbridos reciben un par de genes que ya no son capaces de funcionar en combinación y los híbridos resultantes no son viables. Los cambios genéticos como este podrían crear una barrera para la reproducción y producir nuevas especies.

MASLY, J. P.; JONES C. D.; NOOR, M. A. F.; LOCKE, J.; ORR, H. A. (2006). «Gene transposition as a cause of hybrid sterility in *Drosophila*». *Science* 313: 448-450

Resumen. El gen *JYAlpha* es necesario para la fertilidad masculina de la drosófila. Ese gen se localiza en el cromosoma cuatro de *D. melanogaster*, pero en *D. simulans* se sitúa en el cromosoma 3. Esta diferencia, a veces, da como resultado una falta del gen *JYAlpha* en algunos individuos híbridos, por lo que son estériles. La reducción de la fertilidad que resulta puede llevar a una especiación sin cambios en la secuencia de nucleótidos del gen.

Comentario. La especiación se da cuando dos poblaciones o más quedan aisladas desde el punto de vista reproductivo; lo que quiere decir que pierden la capacidad de reproducirse de manera cruzada a causa de cambios genéticos. Muchos cambios genéticos pueden producir un aislamiento reproductivo y ha sido difícil establecer qué factores pueden ser los responsables. Ambos estudios comentados aquí ofrecen dos mecanismos distintos mediante los cuales se puede establecer o reforzar un aislamiento reproductivo: la divergencia entre genes interactuantes de distintas poblaciones o los cambios en la localización cromosómica del mismo gen en distintas poblaciones. La especiación no contradice la teoría creacionista y estos estudios demuestran que puede resultar a partir de cambios genéticos menores.

RESEÑAS DE LIBROS

Invitamos a nuestros lectores a que nos envíen comentarios sobre bibliografía reciente relacionada con los orígenes a la siguiente dirección postal: ORIGINS, Geoscience Research Institute, 11060 Campus St., Loma Linda, California 92350 USA. Nuestra institución no distribuye las publicaciones reseñadas. Si el lector desea adquirirlas deberá dirigirse al editor.

¿AMIGO O ENEMIGO?

Leonard BRAND. (2006) Beginnings: Are Science and Scripture Partners in the Search for Origins? Nampa, Idaho: Pacific Press, 176 págs. (Ed. esp.: *En el principio...: La ciencia y la Biblia en la búsqueda de los orígenes*. Buenos Aires: ACES, 2007)

Comentado por Dr. Jerry Bergman

Departamento de Geología y Química del Northwest State College

Archbold, Ohio

Beginnings es un excelente resumen, breve y equilibrado, del litigio del creacionismo y la obra que todavía se lleva a cabo en esa área. Sus 176 páginas de lectura fluida y bien ilustradas, aborda temas cruciales que abarcan desde la geología hasta la biología molecular. También se incluye una historia del desarrollo del neodarwinismo contemporáneo, las razones por las cuales la cuestión de los orígenes es importante, modelos de cronología de corta edad e instrucciones para el futuro.

Brand tiene el aval de un doctorado en Biología por la Universidad Cornell, varias publicaciones en la bibliografía científica con evaluación previa (*refereed*) y 35 años de experiencia docente a

nivel universitario. Su mirada a los pros y los contras de ambos bandos es sincera, por lo que este libro es útil tanto para creacionistas como darwinistas. Aunque Brand adopta la postura creacionista, presenta efectivamente la razón por la que muchas personas adoptan el darwinismo, una visión que trata con respeto y de manera objetiva y meticulosa.

El primer capítulo aborda el problema de la terminología. Subsiste una necesidad crítica de discutir las definiciones porque términos como 'creación', 'evolución', 'darwinismo' y otros relacionados con la controversia casi nunca se definen; lo que a menudo lleva a los proponentes de ambos bandos a entablar un diálogo de sordos en el que nadie escucha a nadie. Tiempo atrás, el término 'creación' significaba los medios para producir algo y el término 'creacionismo' designaba una teoría teísta sobre el modo en que se produjo el mundo natural. En la actualidad se ha convertido en un término de ridiculización para referirse a una visión teológica desacreditada, sostenida por quienes desconocen los campos relevantes de la ciencia. Brand indica que algunos defensores de la creación, en cierto grado, encajan en esta definición común en la actualidad. La solución que propone es el uso del término 'intervencionista'. Esta visión tiene sus ventajas, pero es probable que los medios de comunicación de masas y la elite darwinista hagan que este término se transforme en objeto de burlas como ya hicieron con los términos 'diseño inteligente' y la 'teoría de la aparición abrupta'. Sin embargo, este capítulo será útil para que ambas partes entiendan las cuestiones importantes.

En el capítulo 2 Brand muestra el grado de importancia del darwinismo a lo largo del siglo XIX porque cambió por completo la visión cristiana tradicional en todo el mundo y que la mayor parte de la resistencia que se opuso al darwinismo procedía, precisamente, de los científicos. Por ejemplo, no fue hasta aproximadamente la década de los años cuarenta del siglo XX que la mayoría de los biólogos aceptó la principal contribución de Darwin a la teoría del transformacionismo: la selección natural (p. 21). Brand indica con precisión que si Darwin hubiese propuesto esa teoría naturalista en

la actualidad, nuestra manera de entender la célula y su funcionamiento impediría que muchos científicos la aceptaran.

Un ejemplo entre muchos que ilustra de manera efectiva este punto es el sistema de la kinesina para el transporte de materiales, como por ejemplo proteínas, en la célula hasta el punto en que se necesitan. El sistema debe recoger la carga correcta y transportarla hasta el lugar adecuado de la célula. Los transportadores de kinesina se sirven de dos "patas" a las que el ATP proporciona energía para "andar" por las autopistas de la célula construidas a partir de los microtúbulos. Cada tipo de kinesina transporta una carga específica, como un autobús que solo va en una dirección. Para llegar al destino correcto los materiales celulares deben tomar el "autobús" adecuado. Por lo tanto, la kinesina es una máquina a la vez de transporte y de procesamiento de información.

Los principales problemas científicos del darwinismo se resumen brevemente, así como aquellos que presenta la visión intervencionista. Brand explica los puntos fuertes y débiles de tres modelos (geología de inundación, geología holística y geología convencional), y demuestra que en estas áreas todavía se necesita mucho trabajo. Brand destaca los problemas específicos del modelo intervencionista como la observación de que muchas formas de vida modernas no se encuentran en los estratos rocosos cámbricos mientras que otras *solo* se encuentran en algunas capas rocosas (p. 199). En contraste con las afirmaciones de algunos creacionistas, todavía se precisa mucha labor de investigación para llegar a entender la historia de la vida, y quizá nunca lleguemos a obtener respuesta para todas las posibles preguntas que puedan surgir en este ámbito, algunas de ellas cruciales.

Un punto que es preciso esclarecer es el uso no crítico del término '*Dark Ages*' ["Edad Oscura", Alta Edad Media], término este que Francis Schaefer y otros afirman que fue acuñado por los antirreligiosos en un esfuerzo por desacreditar la Iglesia Católica. Stark (2005, pp. 35-68) documenta el significativo progreso que en muchos campos se produjo en esa época, incluida la ciencia. Una de las innovaciones más importantes de ese momento fue «la creación

de las primeras economías que dependían principalmente de la energía no humana» (STARK 2005, p. 38).

Recomiendo encarecidamente este libro tanto a los neófitos como a los investigadores ya entrados en años, así como a creacionistas y darwinistas. Podría ser de gran ayuda a la hora de facilitar un diálogo constructivo entre ambos bandos. La controversia no desaparecerá, sino que se volverá más activa en el futuro a causa de las nuevas investigaciones, en particular en el campo de la biología molecular. Por consiguiente, para que se dé alguna resolución, o al menos una acomodación, se requiere un diálogo constructivo de manera que cada uno de los bandos pueda, como mínimo, entender y, sería el ideal a alcanzar, respetar la posición del oponente. La obra de Brand es un acercamiento humilde que evita la confrontación innecesaria y vendrá en ayuda del inicio del muy necesario diálogo entre distintos defensores de las distintas posiciones. También muestra que es posible desarrollar una buena defensa en favor de la visión bíblica del mundo.

Bibliografía citada

STARK, R. (2005). *The Victory of Reason: How Christianity Led to Freedom, Capitalism and Western Success*. Nueva York: Random House.

NO EVO-DEVO

Giuseppe SERMONTI. (2005). Why is a Fly not a Horse? Seattle (Washington): Discovery Institute, 165 págs.

Comentado por Dr. David N. Mbungu
Departamento de Biología, Universidad Andrews
Berrien Springs, Míchigan

En *Why Is a Fly Not a Horse?* Giuseppe Sermonti, profesor de genética retirado y redactor jefe de la *Rivista di Biología*, cuestiona la legitimidad de la teoría evolucionista y da pruebas sacadas de la biología para destacar sus falacias. A causa de su fuerte visión antievolucionista, el autor es consciente de que se lo tildará de creacionista. Sin embargo, renuncia al creacionismo y expresa su deseo de ser «tan solo una criatura» (p. 18).

A lo largo del libro Sermonti entreteje conceptos como genética, biología molecular, paleontología y otros métodos de investigación científica para arrojar luz sobre las contradicciones entre los postulados evolucionistas de Darwin y las evidencias empíricas actuales. Se desalienta ante la especulación de que la selección natural haya diversificado la vida por medio de un proceso gradual de captura y transmisión de mutaciones de la línea germinal; una visión que considera, a la vez, como conjetura y ficción filosófica. Al contrario, la selección natural es una fuerza conservadora que estabiliza las poblaciones mediante la resistencia al cambio: «Solo las oscilaciones que derivan de la variabilidad genética capacitan a una especie para permanecer fiel a su tipo» (p. 49). Y añade que, además, las mutaciones no pueden ser responsables de la variabilidad genética de los organismos porque la mayoría son deletéreas o neutras.

Sermonti se sirve del "relojero ciego" de Richard Dawkins para ilustrar el modo en que los defensores del darwinismo emplean el dogma evolucionista como un factor guía en la experimentación y la interpretación de los datos. Sermonti advierte del peligro de forzar y sesgar los datos para apoyar visiones preconcebidas y argumenta

que la evaluación de los resultados de Dawkins lleva a conclusiones opuestas a las sacadas por Dawkins: «A menos que haya un diseño preestablecido, nada –nada en absoluto– puede llegar a existir» (p. 56).

A lo largo del libro se presentan pruebas de genética molecular, incluyendo reflexiones sobre el progreso conseguido en el establecimiento del mapa cromosómico. Muchos tenían la esperanza de que un logro de ese tipo facilitara la construcción de patrones de consanguinidad objetivos entre los organismos. No obstante, los estudios no han revelado correlación alguna entre el número de cromosomas y la consanguinidad. Por ejemplo, un asno tiene 31 cromosomas y un caballo 32, mientras que las cebras, muy parecidas morfológicamente a los asnos, tienen solo 16. El autor concluye que esos estudios solo han tenido éxito para eclipsar los organismos sobre los cuales se suponía que debían arrojar luz.

Después de esto, Sermonti evalúa el éxito de los estudios bioquímicos, morfológicos y paleontológicos en la elucidación de las relaciones entre los organismos. ¿Es posible que la dotación genética sea responsable de la identidad de las especies y la diversidad de los organismos? Una vez más, su argumentación es contraria a esta suposición poniendo de manifiesto el grado notablemente alto de similitud bioquímica entre grupos de organismos filogenéticamente distintos y morfológicamente diversos. Por ejemplo, la proteína citocromo c se conserva en gran medida en todas las especies hasta ahora estudiadas, lo que demuestra la “estasis” evolutiva de esta proteína. Cuestiona la confianza en los estudios de anatomía comparada para construir filogenias dado que esos estudios revelan similitudes o disimilitudes estructurales pero no el “significado” de los parámetros estudiados y advierte contra la explicación de las adaptaciones morfológicas en los organismos basada en sus necesidades percibidas.

Sermonti observa que, contrariamente a lo que se esperaba, los estudios que intentan armonizar las filogenias moleculares, la humana y la de los simios, con la paleoantropología se han visto dificultadas por la escasez de fósiles de primates y la falta de formas intermedias en la vía evolutiva humana. El descubrimiento de

fósiles de presuntos progenitores humanos mucho antes de los primates divergía del árbol ancestral según los datos moleculares anula la afirmación de Darwin según la cual el hombre desciende de los simios y exige una explicación alternativa. «La verdad», dice Sermonti, es que el hombre «siempre ha sido lo que es. Desde el inicio, las moléculas y los cromosomas de los seres humanos ya estaban ahí» (p. 77).

Sermonti afirma que, así como el color del uniforme no tiene nada que ver con la deportividad de un equipo o su habilidad, la vida molecular está gobernada por "convenciones" definidas como «normas no dictadas por las necesidades situacionales» de un organismo (p. 82). Las convenciones son tan cruciales para la vida como el código genético y están interrelacionadas con las identidades. Esto lo ilustra con dos ejemplos: 1) el comportamiento de orientación típico de cada especie en las aves migratorias criadas en aislamiento que las mueve a iniciar el vuelo a la más mínima oportunidad que se les presenta, y 2) las células del tripanosoma que pueden empezar con transcripciones truncadas de genes de ARN y producir transcripciones de ARNm que se traducen en enzimas activas.

Ambos ejemplos revelan la existencia en los organismos de un "conocimiento oculto" inaccesible mediante la investigación empírica.

Al poner como ejemplo los priones, que se heredan de manera independiente del ADN, el autor relega el ADN a un papel meramente secundario en la determinación de las características morfológicas. Argumenta que el desarrollo está guiado por uno, o más, de los «destinos morfológicos que se encuentran a la espera en algún lugar», para impulsar el cambio (p. 103). Las estructuras específicas que menciona que se forman sin cadenas complementarias de ADN, incluyen los caparazones de los moluscos en su inmensa variedad. Sermonti defiende que la súbita aparición de patrones sorprendentemente similares en distintos organismos sin que intervenga el ADN –y, por ende, sin una selección acumulativa– no contradice que el ADN desempeñe un papel secundario en la emergencia de tales procesos. Sermonti supone que las diferencias mor-

fológicas pueden surgir sin que subyazca una diferencia genética, tal como ilustran las castas de termitas, cuyos miembros difieren morfológicamente aunque conserven una identidad genética.

El autor sopesa el impacto de la aprobación de la evolución orgánica por parte de la Iglesia Católica en el debate "mente-cuerpo". Piensa que el decreto papal, según el cual la mente y el cuerpo tienen una existencia separada e independiente en la que el cuerpo evoluciona orgánicamente hasta que se ve invadido por el alma mediante un "salto ontológico", es perturbador. La postura de Sermonti es contraria a esta visión y expresa su convicción de que «el hombre nació súbitamente tras un gran salto» (p. 114).

Hacia el fin del libro, Sermonti destaca las pruebas del registro fósil que refutan la evolución darwiniana: insectos hoja en fósiles de fecha anterior a la evolución de las plantas, la súbita explosión de la vida compleja en el Cámbrico y la falta de fósiles intermedios. Concluye que el apego de los defensores del evolucionismo a su dogma los ha empujado a obviar aquellos datos que no confirman su teoría.

Aunque el autor no responda a la pregunta retórica: «¿por qué una mosca no es un caballo?», su evaluación franca y objetiva de la teoría evolucionista con un estilo que es provocativo y entretenido a la vez hace de este libro una fuente valiosa para los biólogos.

¿QUIÉN CREÓ TODO ESTO?

Guillermo GONZÁLEZ; Jay W. RICHARDS. (2004). The Privileged Planet: How Our Place in the Cosmos is Designed for Discovery. Washington, D.C.: Regnery, 444 págs.

Comentado por Dr. Mart de Groot
Astrónomo y pastor retirado, Irlanda del Norte

La autoría de este libro interesante y extraordinario corresponde a un profesor investigador asistente de astronomía (González) de la Iowa State University y un exvicepresidente y consultor (Richards) del Discovery Institute. La colaboración entre un científico y un investigador de un instituto que propugna activamente el Diseño Inteligente puede parecer inusual. Recuérdese, sin embargo, que la astronomía es una de las disciplinas que más pruebas proporcionan en favor del diseño gracias a la manera en que las cifras naturales parecen estar finamente calibradas para facilitar el origen y la existencia de la vida. No obstante, este libro no aborda el tema de la vida en sí.

Los autores parecen haber establecido un objetivo nuevo que no parece que antes haya sido buscado siguiendo la visión directa que adopta este libro. Sostienen que, más allá de los signos destacables de calibrado preciso para la vida, existe al menos otro fenómeno igualmente interesante. Nuestro planeta, además de ser un buen lugar para vivir, también es un buen lugar para descubrir los muchos y variados aspectos del universo. En este sentido, es preciso destacar, aprovechar y meditar sobre la coincidencia en la Tierra de la presencia de vida inteligente y tecnológica –*habitabilidad* según su nomenclatura– y las mejores condiciones posibles para el descubrimiento del cosmos más amplio –*mensurabilidad*–.

El texto se divide en tres secciones. La primera aborda el medioambiente local. Las medidas aparentes casi iguales del Sol y la Luna dan origen a los eclipses solares que son la base de la antigua cronología. También permiten el estudio de la atmósfera exterior

solar. El conocimiento así obtenido es susceptible de ser extrapolado con el fin de entender las estrellas. La Luna es esencial para la estabilidad de la inclinación del eje de rotación de la Tierra (lo que permite un régimen estacional regular), las mareas, las corrientes oceánicas, el campo magnético terrestre y la tectónica de placas. Fenómenos como los anillos de los troncos de los árboles, los estratos del hielo de los casquetes polares y los elementos en ellos encontrados, así como los arrecifes de coral, entre otros, nos dan una visión de la historia de la Tierra. La investigación geológica todavía nos informa de otros aspectos del pasado de nuestro planeta.

Al mirar a nuestros vecinos del Sistema Solar nos apercibimos de su importancia crucial. Júpiter, por ejemplo actúa como un "guardián" que hace posible que el Sistema Solar interior se mantenga relativamente libre de impactos de grandes cometas y asteroides. Mientras la atmósfera terrestre no siempre permite que los astrónomos gocen de una visión clara del cosmos, nos protege de los rayos ultravioleta cancerígenos y otras radiaciones de elevada energía. He aquí uno entre muchos de los ejemplos de cómo la mensurabilidad y la habitabilidad andan de la mano.

La segunda sección aborda la cuestión de la investigación del gran cosmos: las estrellas, las galaxias y las estructuras a gran escala del universo. Nuestra ubicación en la periferia de un brazo espiral, alejados del centro de la galaxia de la Vía Láctea es otro requisito indispensable para maximizar nuestros estudios observacionales del universo, a la vez que salvaguarda y protege la vida.

Las observaciones de este tipo, junto con el preciso calibrado de un sinnúmero de cantidades físicas esenciales para el origen y la existencia de la vida, se discuten al lado de conceptos como las zonas de habitabilidad circumestelares, zonas de habitabilidad continua circumestelares y zonas de habitabilidad galácticas que, todos ellos, enfatizan el estrecho vínculo que existe entre la mensurabilidad y la habitabilidad. Si bien algunos ven estas observaciones como una mera coincidencia explicada por el principio antrópico, otros las interpretan como producto de un diseño.

Los autores explican muy bien el modo en que la teoría del *Big Bang* da una descripción científica aceptable del cosmos. A primera

vista, los períodos temporales requeridos por la teoría del *Big Bang* son extremadamente largos en comparación con la corta escala temporal relatada en los primeros capítulos de la Biblia. Los autores, aparentemente, se muestran partidarios de la ciencia naturalista. Sugiero que el lector saque sus propias conclusiones sobre esta cuestión volviendo a estudiar los primeros capítulos del Génesis y observando cuidadosamente cuanto dice o silencia la Biblia sobre el tiempo requerido en la creación del universo. Por desgracia, los autores eluden comprometerse al respecto de esta cuestión.

La tercera sección tiene que ver con temas variados que van desde la historia de la ciencia hasta cuestiones sobre la existencia de vida extraterrestres inteligente, argumentando que el principio de Copérnico –la noción de que «debemos aceptar que no hay nada de especial o excepcional en el lugar y el tiempo que ocupa la Tierra en el cosmos»– es una premisa falsa. Presentan seis predicciones basadas en el principio de Copérnico que no se han cumplido en el universo. Como resultado, sostienen, la Tierra no es solo un planeta ordinario e insignificante en un sistema planetario muy ordinario centrado por una estrella muy ordinaria en una región muy típica de una galaxia muy común. De hecho, la Tierra es un planeta muy especial y es muy probable que sea el único de todo el universo que albergue vida.

Para quienes encuentran pruebas bíblicas de vida extraterrestre (distinta de los ángeles) puede ser útil pensar en la existencia de otros universos, tan hipotéticos como el hecho de que nuestro lugar en el universo sea el mejor posible para un planeta poblado por unos seres inteligentes y curiosos. Este es el punto en que el argumento de González y Richards es más fuerte y en el que sería de máxima utilidad una declaración más directa sobre la naturaleza de una inteligencia diseñadora y, quizá, la razón de por qué el diseño incluyó situar la vida en la mejor plataforma de observación posible del universo. ¿Acaso el diseñador pretendía que pudiésemos descubrirlo mediante el estudio del universo? Vienen a la mente textos como el Salmo 19: 1 e Isaías 40: 26.

Los autores han hecho una labor minuciosa al explicar cuestiones científicas a un nivel semidivulgativo. Quienes deseen profundi-

zar en el tema encontrarán una información de gran valor en las setenta páginas de notas bibliográficas y de otros tipos así como en índice de 24 páginas de gran utilidad. No es preciso estar de acuerdo con todo cuanto dicen los autores, pero en este libro hay muchos aspectos que son susceptibles de ponderación. Con toda seguridad, el universo no está calibrado con precisión únicamente para proporcionar un hábitat para la vida humana; también fue diseñado para que nos encontremos con el Diseñador.

UNA CONVERSACIÓN INCONCLUSA

Keith THOMSON. (2005). Before Darwin: Reconciling God and Nature. New Haven (Connecticut): Yale University, 314 págs.

Comentado por Dr. Gary Land
Departamento de Historia y Ciencias Políticas
Universidad Andrews, Berrien Springs, Michigan

Desde que en 1986 se publicara *Evolution: A Theory in Crisis* de Michael Denton, el movimiento del Diseño Inteligente (DI) ha inspirado muchas publicaciones, tanto en favor como en contra. El debate del DI empujó a Keith Thomson, profesor emérito de historia natural en la Universidad de Oxford y autor de, entre otras obras, *Morphogenesis and Evolution* y *H.M.S. Beagle*, para que viera de manera distinta al desarrollo de ese argumento en los siglos XVII al XIX. Thomson intenta entender por qué el argumento del diseño cayó en desgracia hace aproximadamente ciento cincuenta años y las implicaciones que tiene ese fracaso en su más reciente iteración.

El autor define el escenario poniendo de manifiesto las conexiones entre William Paley, el más famoso de quienes formularon el argumento moderno en favor del diseño, y Charles Darwin, cuya teoría de la selección natural sustituyó la interpretación teleológica. Darwin, además de ocupar las mismas habitaciones del Christ College de Cambridge que setenta años antes ocupara Paley, estudió su *Teología natural*, que más tarde describió como «la máxima ayuda en la educación de mi mente» (p. 6).

Paley escribió sus obras en réplica a la creciente ciencia materialista y mecanicista desarrollada en el siglo XVIII que ya sugería que la vida había surgido gracias a procesos puramente naturales. Thomson escribe bromeando: «Paley leyó a Erasmus Darwin, retrocedió y tomó la pluma» (p. 38). Además, la *teoría de la Tierra* de James Hutton había sacado a la luz pruebas de que el planeta mismo era extremadamente antiguo, sus características geológicas

resultado de un equilibrio de fuerzas físicas que parecían incompatibles con el relato de la creación del Génesis.

El argumento minimalista de Paley, que solo abordaba la existencia de Dios, surgió de los cada vez más torturados intentos de los primeros teólogos naturales por acomodarse al nuevo pensamiento científico. John Ray, considerado el "padre fundador" de la teología natural moderna, argumentó hacia 1660 que la complejidad de la naturaleza revelaba su origen sobrenatural. Aunque el concepto que Ray tenía de las especies sugería que la naturaleza era estática e inmutable, el descubrimiento de los fósiles, seguido de la identificación de la estructura interna de la Tierra y, finalmente, una comprensión cada vez mayor de la relación que existe entre un fósil determinado y cierto tipo de rocas supusieron un reto a la comprensión según la ortodoxia religiosa. En respuesta, escritores como Steno, Robert Plot, Thomas Burnet, John Woodward, William Whiston y otros desarrollaron "teorías santas" que intentaban reconciliar la evidencia de fenómenos como la construcción de una montaña con las ideas tradicionales de una creación especial y uno o más diluvios. Thomson argumenta que la ausencia de una teoría de tectónica de placas –descrita como «un mecanismo real y comprobable» (p. 190)– permitió que esas teorías santas consiguieran arraigar.

Mientras, a través de la obra de Erasmus Darwin, Comte de Buffon, y Jean-Baptiste de Lamarck, surgían las teorías evolucionistas que postulaban que la naturaleza tenía en su seno una normativa que «es causa de un proceso generativo» y produjo variaciones «moldeadas por el azar o las circunstancias» (p. 215). Aunque el insuficiente conocimiento de la genética fue un límite para que en el siglo XIX se conociera adecuadamente el cambio biológico, la teoría de Charles Darwin de la selección natural, concentrándose en los «fenómenos con sentido común», proporcionó un mecanismo causal que parecía explicar el cambio y la variación en la naturaleza.

Volviendo a Paley, Thomson argumenta que su teología natural también apoyaba la conservación de una sociedad oligárquica, una visión que se refuerza con su lectura de la teoría del crecimiento de la población formulada por Thomas Malthus. Esta conexión con

Malthus dio origen a una de las ironías interesantes de la historia. «Al adoptar tan pronto y con tanta fuerza las ideas de Malthus», escribe Thomson, «Paley contribuyó a promulgarlas y, en última instancia, colaboró en la promoción del ateísmo en la forma de la teoría evolucionista de Darwin, quien reconocía que tanto Paley como Malthus habían ejercido una profunda influencia en su pensamiento» (p. 259).

En lugar de escribir un relato cronológico del auge y caída de la teología natural, Thomson ha construido su historia como un diálogo entre Paley y sus colegas teólogos naturales enfrentados a sus desafiadores científicos. Thomson entra en la conversación y sugiere que la controversia sobre la evolución forma parte de un largo conflicto entre la explicación racional y la aceptación del misterio. Aunque declara que «el hecho de la evolución como un proceso de cambio a lo largo del tiempo está constantemente sometido a prueba y siempre ha salido airoso» (p. 203), también muestra cierta simpatía por las explicaciones religiosas e intenta liberarlas de sus más fervientes partidarios. Escribe que «con el uso de términos como 'inteligente', 'diseño' y 'bueno' surge el problema de que es fácil pensar en aplicarlos literalmente en un sentido humano». «A la vez, al describir a Dios como demasiado misterioso también siempre se corre el riesgo de hacerlo demasiado remoto y al hacerlo demasiado asequible y demasiado semejante a nosotros se corre el riesgo de banalizarlo» (p. 235).

Thomson sugiere que la ciencia y la religión son empresas complementarias que hasta el momento «no han sido capaces de ponerse de acuerdo sobre la reformulación de una serie de preguntas que pueden abordar conjuntamente». El libro se cierra con una descripción del Oxford University Museum aún sin terminar, financiado con la publicación de la Biblia de la Oxford University Press y sede del famoso debate Wilberforce-Huxley sobre el darwinismo que el autor considera como «una metáfora sobre el trabajo de la ciencia y la reconciliación de la ciencia con la religión» (p. 279).

Before Darwin refleja que el autor ha leído con detenimiento las fuentes primarias, incluyendo tanto las obras históricamente significativas de autores como Burnet, Paley y Darwin, así como las de

autores más recientes que van desde Owen Gingerich y Davis Young a Ronald L. Numbers. Thomson también revela un profundo conocimiento de las Escrituras y las cita de manera ocasional pero efectiva. Con todo, se reviste de una cierta erudición porque la bella y cautivadora prosa y la estructura del libro invitan al lector para que participe en el diálogo y no se mantenga como un mero observador.

Thomson no se muestra neutral, aunque sí crítico, en el relato del conflictivo desarrollo de la teología natural y, por ello, resulta convincente. Quien desee entender tanto el desarrollo histórico como la reciente reformulación del argumento del diseño considerará que este volumen es indispensable. Si bien el autor escribe desde un punto de vista evolucionista, sin esforzarse por determinar su validez, su análisis histórico será útil para los partidarios del creacionismo o el diseño inteligente. Además, la sugerencia hecha en *Before Darwin* al respecto de que la ciencia y la religión mantienen una conversación inconclusa ofrece una pequeña, pero esperanzadora, visión para aquellos creyentes, en especial los cristianos, que se toman la ciencia en serio.

¿DESVELANDO DE NUEVO EL SECRETO DEL ALMACÉN?

Michael RUSE. (2005). The Evolution-Creation Struggle. Cambridge (Massachusetts): Harvard University, 327 págs.

Comentado por Tristan Abbey
Stanford University, Palo Alto, California

El nombre de Michael Ruse no es desconocido para quienes están involucrados en la controversia al respecto del evolucionismo. *The Evolution-Creation Struggle* es la última de una larga serie de obras muy respetable al respecto del debate sobre los orígenes. Este filósofo de la ciencia es, quizá, más conocido por el testimonio que en 1981 diera en el Juicio de Arkansas, en el que se llegó a la conclusión de que el creacionismo tiene poca base científica. En este libro Ruse argumenta muy intensamente que «en el evolucionismo y en el creacionismo tenemos respuestas rivales ante una crisis de fe» (p. 3). En última instancia, el evolucionismo y el creacionismo son religiones separadas.

Ruse prologa su libro con una breve discusión sobre el debate y explica que la razón de su existencia es mayor que la simple afirmación de que los creacionistas no consiguen comprender la ciencia. Para definir el contexto da una breve historia del cristianismo y enmarcando la Reforma y la Ilustración, a la vez que comenta a Descartes, Hobbes, Paley y otros. Introduce la idea del progreso que «siempre andaba a vueltas con cualquier ideología, ya fuera cristiana o de cualquier otro tipo, que negase la autonomía humana y nuestra capacidad de trabajar para mejorar el estado de las cosas» (p. 24). El progreso como motor filosófico es un tema recurrente en todo el libro. Destaca que para los filósofos franceses, «el progreso en sentido estricto era la oposición directa al cristianismo» (p. 24).

Gracias a su admirable conocimiento de la historia de la ciencia, Ruse trae a un primer plano la idea de que ambas partes están mo-

vidas más por razones filosóficas o religiosas que científicas. Ruse argumenta que hacia la época en que Darwin publicara *El origen de las especies* «el evolucionismo ya hacía tiempo que estaba en el ambiente y muchas personas buscaban una razón para creer en él» (p. 85).

Ruse responde una pregunta que muchos se han planteado: ¿era Darwin cristiano? Explica que la visión de Darwin evolucionó desde el cristianismo al deísmo y, poco antes de su muerte, el agnosticismo. También da detalles sobre las creencias religiosas de otros personajes importantes, incluidos John Henry Newman y Richard Owen. Estos detalles refuerzan la defensa de que el evolucionismo estaba alimentado con puntos de vista filosóficos predeterminados.

En la descripción del trabajo de los evolucionistas en los años posteriores a 1949, Ruse explica que, si bien su compromiso con la investigación rigurosa era firme, no lo era menos el compromiso que tenían con el progreso: «El progreso era su profesión y el evolucionismo su obsesión» (p. 187). «Publicaron dos tipos de libro. Uno de ellos era profesional, sin referencia alguna al progreso. El otro era popular, repleto de comentarios sobre progreso. Eran dos mensajes para dos públicos distintos» (p. 187).

Ruse también aborda el "darwinismo social" de Spencer, el auge y el declive del progreso a lo largo de los siglos y las distintas tendencias del cristianismo (fundamentalismo, premilenarismo, posmilenarismo, evolucionismo teísta, etc.). Periódicamente Ruse trae a la memoria del lector los distintos contextos históricos: la Revolución Francesa, las dos guerras mundiales, la guerra fría y el Vietnam.

Además, retrotrae al lector al caso del juicio del Mono de Scopes, marcadamente distinto a la interpretación basada en la visión hollywoodiense. *Heredarás el viento* [La película en castellano recibió dos títulos, el otro título: *La herencia del viento N. del E.*], película menospreciada por muchos por ser una enorme distorsión, «se tomó demasiadas libertades en el relato de los hechos» (p. 166). Ruse destaca que William Jennings Bryan «parecía un bufón cuando preguntaba la duración real de los días de la creación. En la vida

real, Bryan siempre creyó que esos días eran períodos de tiempo» (p. 167).

Se da una interesante historia de cómo se desarrolló el Diseño Inteligente (DI), desde *Juicio a Darwin* de Phillip Johnson hasta la explicación del filtro de diseño de William Dembski, pasando por la complejidad irreducible y Michael Behe. Su explicación del DI es sorprendentemente precisa (pp. 251-255) y reconoce que «sería un error clasificar el movimiento del diseño inteligente como creacionista sin ninguna calificación» (p. 256), a la vez que explica que muchos teóricos del diseño aceptan distintos aspectos de la evolución. Sin embargo, destaca que «hay buenas razones para ver ese grupo como una parte de una tradición vigente» (p. 261). No está nada mal.

No obstante, el resumen de Ruse sobre el actual estado de la teoría evolucionista deja mucho que desear. Según él, «los descubrimientos de fósiles producidos durante los últimos cincuenta años fueron absolutamente impresionantes» (p. 198) y proporcionaron nuevas pruebas en favor de la evolución. Aunque, a renglón seguido, admite que el origen de la vida «siempre ha sido un gran quebradero de cabeza para los evolucionistas» (p. 299) y afirma que el principal obstáculo es que los investigadores del origen de la vida son víctimas de un exceso de ideas. En última instancia, reconoce que «persisten [...] grandes lagunas en nuestro conocimiento de los mecanismos evolutivos» (pp. 200-201).

Un aspecto fascinante de este libro es los paralelismos que los lectores pueden extraer (aunque Ruse no lo haga) entre el esfuerzo del evolucionismo por obtener reconocimiento como "ciencia profesional" y el trabajo que se hace en la actualidad en favor del avance del DI. Según Ruse, hasta la época de Huxley y Darwin el evolucionismo era una simple pseudociencia. El desarrollo de una "ciencia profesional" evolucionista no se daría hasta décadas más tarde, con la aparición del trabajo de Ronald Fisher y Sewall Wright. Será preciso ver en qué punto de esta vía se encuentra la comunidad del Diseño Inteligente.

El atractivo de este libro reside en su tono cálido y amable. La clara perspicacia de Ruse compensa con creces los fatigosos inter-

ludios poéticos. En la discusión de la respuesta de la Iglesia Católica al evolucionismo, por ejemplo, explica su reticencia a entrar en liza: «Doscientos años antes, en el conflicto con Galileo, dio un paso en falso y ahora estaba deseando que los protestantes pasasen por ese mismo mal trago» (p. 142). Entre otras ocurrencias encontramos: «Dios es famoso por moverse de manera misteriosa» (p. 163) y su descripción de *Vestigios de la Historia Natural de la Creación* de Robert Chambers como la «gran superhamburguesa de la ciencia popular: muy apetitosa, llena mucho, muy asequible y, en opinión de las autoridades, de valor más que dudoso para la propia salud» (p. 48).

Ruse concluye con un llamado a las armas y se lamenta de que mientras la comunidad antievolucionista es capaz de trabajar unida a pesar de las diferencias religiosas, los evolucionistas están amargamente divididos entre evolucionistas teístas y el Richard Dawkins del mundo, los cuales «no son más que la punta de un témpano helado» (p. 273). Exhorta a sus colegas para que no se queden en la crítica virulenta del creacionismo y el diseño inteligente y vayan más allá para descubrir «por qué otros, a menudo, tienen preocupaciones legítimas, [...] una visión de las cuestiones más bien informada y consciente» (p. 288) en una controversia que, sencillamente, no desaparecerá.

GENOMAS Y DISEÑO

Timothy G. Standish, *Geoscience Research Institute*

En los últimos años la publicación de nuevos genomas casi se ha convertido en una rutina. En noviembre de 2006, *Science* publicó el genoma del erizo de mar púrpura.[1] A causa de una supuesta relación entre los erizos de mar y los cordados, el genoma de esta criatura es de particular interés debido a la información que da sobre el origen de esas criaturas y su ordenación genética. Las taxonomías actuales clasifican a los equinodermos, incluidos los erizos de mar, con los deuteróstomos, que incluyen los hemicordados y los cordados. En un marco darwiniano, ello significa que todos los genes que comparten los seres humanos y los erizos de mar debieron estar presentes en un ancestro común compartido en algún momento previo a los estratos cámbricos que contendría formas fósiles tanto de equinodermos como de cordados.

Quizá los descubrimientos más sorprendentes surgidos en a comparación del genoma de *S. purpuratus* con otros genomas secuenciados hayan sido el número de genes presentes y la similitud entre esos genes y los genes de otros deuteróstomos. Se calcula que el número de genes en *S. purpuratus* es de 23.300, muy similar a los cálculos de otros genomas, incluido el genoma humano. Desde una perspectiva evolucionista esto resulta especialmente sorprendente porque se piensa que, para explicar el genoma de los cordados se necesitan dos duplicaciones de genoma que den como

---

[1] SEA URCHIN GENOME SEQUENCING CONSORTIUM. (2006). «The genome of the sea urchin *Strongylocentrotus purpuratus*». *Science* 314: 941-952.

resultado cuatro copias del genoma ancestral. Puesto que en los equinodermos no se invocan las duplicaciones de genoma, el número de genes debe ser explicado según un mecanismo distinto en el que se dieron muchas pequeñas duplicaciones. Por tanto, la explicación darwinista de la similitud en el número de genes da como resultado una explicación generosa a pesar de la similitud de las estimaciones en el número de genes.

La comparación de las familias de genes entre el genoma de *S. purpuratus* y los genomas de otros deuteróstomos revela una destacable falta de originalidad. «La distribución de proteínas entre aquellas familias conservadas demuestra la tendencia de expansión y reducción de las familias de proteínas preexistentes y no una frecuente innovación o pérdida de genes.»[2] Esto significa que la tarea verdaderamente difícil de inventar nuevas clases de genes tuvo que haber ocurrido antes de la división entre cordados y equinodermos. En un marco convencional, esto elimina más de quinientos millones de años del tiempo disponible para los genes compartidos entre los deuteróstomos para evolucionar mediante un mecanismo neodarwiniano de mutación-selección.

Se ha demostrado que la duplicación de genes no es un mecanismo viable para la producción de genes con nuevas funciones, incluso en una misma familia de genes.[3] Presumiblemente ello significa que la creación de genes realmente nuevos de los que se supone que se han desarrollado varias familias de genes mediante la duplicación y la modificación sería un logro significativamente más difícil. Por tanto, la producción de los genes originales a partir de los cuales los darwinistas aventuran que se derivan las familias de genes debe superar con creces la capacidad de los procesos darwinianos. El descubrimiento verdaderamente sorprendente es que *S. purpuratus* comparte genes que se creían específicos de los

---

[2] Ibídem, p. 943.

[3] BEHE, B. J.; SNOKE, D. W. (2004). «Simulating evolution by gene duplication of protein features that require multiple amino acid residues». *Protein Science* 13: 2.651-2.664.

vertebrados. En ellos se incluyen genes relacionados con la inmunidad adaptativa y, virtualmente, todo el conjunto de genes involucrados en el síndrome de Usher, una alteración genética que afecta al oído, el equilibrio y la vista. Pero la situación empeora cuando se compara el genoma de *S. purpuratus* con los bilaterales protóstomos. Se da el caso que «los genes de los bilaterales están presentes en muchos más grupos»[4] de lo que previamente se pensaba, con lo que se reduce aún más la ventana temporal para que la mutación y la selección natural produzcan esos genes.

Algunos genes son específicos de *S. purpuratus* y uno de sus subconjuntos proporciona oportunidades únicas para examinar el tiempo disponible para su evolución en un marco darwiniano. Entre los genes específicos de los equinodermos que más información proporcionan se encuentran los que están implicados en la formación del estereoma, el tejido endoesquelético característico de todos los equinodermos.[5] Ahora se propone que «la batería de genes específicos de la matriz del estereoma (por ejemplo, la variedad de funciones estructurales codificada en sus diversas proteínas, así como los controles que la regulan) debió ensamblarse en un tiempo tan remoto como el Cámbrico Inferior».[6] El período temporal sugerido para la evolución de este grupo de genes y sus controles reguladores abarca desde 542 Ma a 520 Ma, aproximadamente 22 millones de años. Esto centra más las cuestiones sobre cuánto tiempo y qué es preciso lograr de acuerdo con las presuposiciones darwinianas respecto de los mecanismos y el tiempo. La publicación de este genoma permite una evaluación más realista de lo que se afirma que consiguieron los mecanismos neodarwinianos, incluso en un marco de eras dilatadas.

Un aspecto inusual de la publicación de este genoma en particular fue la copublicación de artículos que detallaban cuándo un gen

---

[4] SEA URCHIN GENOME SEQUENCING CONSORTIUM, p. 950.

[5] BOTTJER, D. J.; DAVIDSON, E. H.; PETERSON, K. J.; CAMERON, A. R. (2006). «Paleogenomics of echinoderms». *Science* 314: 956-960.

[6] Ibídem, p. 958.

específico era activo en el genoma.[7] Ello fue posible en parte por el hecho de que, durante algún tiempo, *S. purpuratus* ha sido un organismo modelo para el estudio del desarrollo. Ese estudio reveló que alrededor de la mitad de los genes identificados en este organismo están activos en la embriogénesis. A primera vista, esto podría apoyar la hipótesis de Lynn Margulis al respecto de que las criaturas pueden expandir sus genomas "fusionándolos" con los de otros organismos. Por lo tanto, «los rasgos adquiridos se pueden heredar no como rasgos, sino como genoma».[8] Al desarrollar esta versión "simbiótica" de la historia evolutiva abraza las ideas de Donald I. Williamson que explica los organismos que tienen un estado larvario y adulto diferenciados como producto de los genomas de dos organismos distintos y cita específicamente los erizos de mar como ejemplo de organismo que adquirió los genes para su estado larvario a partir de otro organismo.[9] El problema surge en el momento en que ciertas clases de genes, por ejemplo, la mayoría de factores de transcripción y proteínas indicadoras) se expresan durante la embriogénesis,[10] lo que hace insostenible la teoría de que los genes de un genoma se expresan pronto en el desarrollo mientras que los del genoma "adulto" se expresan más tarde.

Desde la publicación en 1998 del primer genoma eucariota multicelular (*Caenorhabditis elegans*),[11] la publicación de cada genoma sucesivo ha revelado invariablemente hallazgos que son sorpren-

---

[7] Véase el número correspondiente al 1/12/2006 de *Developmental Biology* 300, pp. 1-496.

[8] MARGULIS, L.; SAGAN, D. (2002). *Acquiring Genomes: A theory of the origin of species*. Basic Books, p. 41.

[9] WILLIAMSON, D. I. (2006). «Hybridization in the evolution of animal form and life-cycle». *Zoological Journal of the Linnean Society*: 585-602.

[10] SAMANTA, M. P.; TONGPRASIT, W.; ISTRAIL, S.; CAMERON, R. A.; TU, Q.; DAVIDSON, E. H.; STOLE, V. (2006). «The transcriptome of the sea urchin embryo». *Science* 314: 960-962.

[11] *C. ELEGANS* SEQUENCING COBNSORTIUM. (1998). «Genome sequence of the nematode *C. elegans*: a platform for investigating biology». *Science* 282: 2.012-2.018.

dentes en un marco darwiniano cuya descripción es inevitable en términos de diseño. El genoma del erizo de mar no es una excepción. Para los creacionistas bíblicos, «la inesperada sofisticación del genoma del erizo de mar»[12] es esperada, no inesperada. La idea de que en distintos organismos «los mismos [genes] se usan de distinta manera»,[13] así como las bombas y los motores usan los pistones de manera distinta, es improbable que deje "devanándose los sesos" a los que son conocedores del diseño de las máquinas.

La mayoría de los creacionistas quedarán impresionados con el lenguaje del diseño empleado en la descripción del genoma del erizo de mar. El genoma de *S. purpuratus* nos ayudará a «entender a simple vista las funciones lógicas que ejecutan en respuesta a los conjuntos de factores de transición en unas células y unos momentos determinados». «El genoma del erizo de mar contribuirá directamente a resolver los principios de diseño de redes genéticas reguladoras para el desarrollo embrionario.» «El genoma no solo proporcionará el "código" para el desarrollo, sino que también contribuirá a la unión entre las redes genéticas reguladoras y la realización efectiva de los acontecimientos del desarrollo.» «Queda pendiente conectar los genes que ejecutan dichas funciones a los circuitos de control que especifican su ocurrencia.»[14] Tal como sucedió con los genomas publicados previamente, el genoma del erizo de mar reduce considerablemente la sostenibilidad de las explicaciones darwinistas a la vez que presenta las características de una creación brillantemente diseñada.

---

[12] PENNISI, E. (2006). «Sea urchin genome confirms kinship to humans and other vertebrates». *Science* 314: 908-909.

[13] WEINSTOCK, G. Citado en: PENNISI, E. *Op. cit.*, p. 909.

[14] Todas las citas de este párrafo proceden de la 3ª columna de la página 939 de DAVIDSON, E. H. (2006). «The sea urchin genome: Where will it lead us?». *Science* 314: 939-940.